



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TRABAJO DE FINAL DE GRADO

Grado en Ingeniería de la energía

**Análisis del escenario RCP 6.0 de futuro de emisiones de
GHG y los correspondientes aumentos de temperaturas en
la superficie terrestre**



Memoria

Autor:	Paula Portet Pimienta
Director:	Olga Alcaraz Sendra
Convocatoria:	Junio 2018

Resum

Aquest TFG presenta un estudi de l'escenari futur d'emissions RCP 6.0 (Representative Concentration Pathways) de l'IPCC mitjançant l'evolució del forçament radiatiu, les concentracions i les emissions de gasos d'efecte hivernacle que defineixen aquest escenari i dels factors conductors de les emissions de CO₂ a nivell mundial pel període 2000-2100. Es delimita l'abast de l'estudi als tres gasos que més contribueixen a l'escalfament global: CO₂, CH₄ i N₂O.

En primer lloc, es fa una comparativa de dues bases de dades en relació a l'evolució forçament radiatiu, la concentració de gasos d'efecte hivernacle i les seves emissions. A continuació s'estudia les principals característiques de l'escenari així com la seva metodologia d'elaboració. Finalment, s'aplica la Identitat de Kaya per realitzar l'anàlisi dels factors conductors de les emissions de CO₂ i de les seves taxes de variació (la intensitat de carboni, la intensitat energètica, el PIB per càpita i la població) i referenciar-ho als escenaris tendencials BAU (Business as Usual).

De l'anàlisi es conclou que tots els valors obtinguts es troben dins del rang pronosticat per l'escenari RCP 6.0, que en general tots els factors conductors segueixen la tendència presentada pels escenaris BAU amb l'excepció de la intensitat de carboni que disminueix dràsticament des de principis del segle. Aquest fet reflecteix que aquest escenari situa una transició energètica en les dècades 2070-2080, principal estratègia de mitigació per aconseguir l'estabilització de les emissions.

Resumen

Este TFG presenta un estudio del escenario futuro de emisiones RCP 6.0 (Representative Concentration Pathways) del IPCC mediante la evolución del forzamiento radiativo, las concentraciones y las emisiones de gases de efecto invernadero que definen este escenario y los factores conductores de las emisiones de CO₂ a nivel mundial para el período 2000-2100. Se acota el alcance del estudio a los tres gases que más contribuyen al calentamiento global: CO₂, CH₄ y N₂O.

En primer lugar se hace una comparativa de dos bases de datos en relación a la evolución del forzamiento radiativo, la concentración de gases de efecto invernadero y sus emisiones. A continuación se estudia las principales características del escenario así como su metodología de elaboración y finalmente se aplica la Identidad de Kaya para realizar el análisis de los factores conductores de las emisiones de CO₂ y de sus tasas de variación (la intensidad de carbono, la intensidad energética, el PIB per cápita y la población) y referenciarlo a los escenarios tendenciales BAU (Business as Usual).

Del análisis se concluye que todos los valores obtenidos se encuentran dentro del rango pronosticado por el escenario RCP 6.0, que en general todos los factores conductores siguen la tendencia presentada por los escenarios BAU con la excepción de la intensidad de carbono que disminuye drásticamente desde principios del siglo. Este hecho refleja que este escenario sitúa una transición energética en las décadas 2070-2080, principal estrategia de mitigación para lograr la estabilización de las emisiones.

Abstract

This work provides a study of the future scenario of emissions RCP 6.0 (Representative Concentration Pathways) of the IPCC through the evolution of the radiative forcing, the concentrations and the greenhouse gas emissions that define this scenario and the drivers of the CO₂ emissions. The scope of the study is limited to the three gases that contribute most to global warming worldwide: CO₂, CH₄ and N₂O for the period 2000-2100.

First, a comparison of two databases is made in relation to the evolution of radiative forcing, the concentration of greenhouse gases and their emissions. Next, the main characteristics of the scenario as well as its elaboration methodology are studied and finally the Kaya Identity is applied to carry out the analysis of the driving factors of the CO₂ emissions and their variation rates (carbon intensity, energy intensity, GDP per capita and human population) and refer to the BAU (Business as Usual) trend scenarios.

From the analysis, it is concluded that all the values obtained are within the range predicted by the RCP 6.0 scenario, which in general, all the drivers follow the trend presented by the BAU scenarios with the exception of the carbon intensity that decreases drastically since the beginning of the century. This fact reflects that this scenario places an energy transition in the decades 2070-2080, the main mitigation strategy to achieve the stabilization of emissions.

Agradecimientos

Agradecer a la directora de este Trabajo de Final de Grado (TFG), Olga Alcaraz y Sendra del Departamento de Física de la EEBE por su buena orientación, ayuda y seguimiento proporcionado durante todo el periodo de realización del presente TFG.

Glosario

AIM :	Asian-Pacific Integrated Model	NDCs :	Nationally Determined Contributions
AR :	Assessment Report		
AR4 :	Fourth Assessment Report	OECD :	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
AR5 :	Fifth Assessment Report	PA :	Acuerdo de París
BAU :	Business as Usual	PFC :	Perfluorocarbonos
CCS :	Carbon Capture and Storage	PIB :	Producto Interior Bruto
CGE :	Computable General Equilibrium	PIK :	Potsdam Institute for Climate Impact Research
CMIP5 :	Coupled Model Intercomparison Project on the fifth phase	PK :	Protocolo de Kyoto
COP :	Conference of Parties	ppb :	Partes por billón
GHG :	Greenhouse Gas	ppm :	Partes por millón
GWP :	Global Warming Potential	RCP :	Representative Concentration Pathways
HFC :	Hidrofluorocarbonos		
IGCC :	Integrated Gasification Combined Cycle	SRES :	Special Report on Emissions Scenarios
IIASA :	International Institute for Applied Systems Analysis	UNDESA :	United Nations Department of Economic and Social Affairs
INDCs :	Intended Nationally Determined Contributions	UNFCCC :	United Nations Framework Convention on Climate Change
IPCC :	Intergovernmental Panel on Climate Change	VISIT :	Vegetation Integrative Simulator for Trace Gases

Índice

RESUM	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
AGRADECIMIENTOS	IV
GLOSARIO	V
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo y alcance del proyecto	1
1.2. Introducción al cambio climático.....	1
1.2.1. Principales gases de efecto invernadero de origen antropogénico	3
1.3. Organismos y políticas internacionales acerca del cambio climático	5
1.3.1. El Protocolo de Kyoto	5
1.3.2. El Acuerdo de París	6
1.3.3. Los informes INDC de la UNFCCC	7
2. LOS ESCENARIOS RCP	9
2.1. Antecedentes. Los escenarios SRES.....	9
2.2. Los escenarios RCP del AR5	9
2.3. El escenario RCP 6.0	10
2.3.1. Modelo integrado AIM	10
2.3.2. Principales características del escenario de futuro RCP 6.0	13
3. DATOS DEL ESCENARIO RCP 6.0	18
3.1. Bases de datos.....	18
3.2. Simulación MERGE_EMF27	22
4. METODOLOGÍA Y RESULTADOS	23
4.1. Introducción a la Identidad de Kaya	23
4.2. Análisis del escenario RCP 6.0 en base a la Identidad de Kaya	24
4.2.1. Evolución de las emisiones, el consumo energético, el PIB y la población	24
4.2.2. Evolución de los factores conductores y sus tasas de variación.....	26
4.2.3. Interpretación.....	29
CONCLUSIONES	32

ANÁLISIS DE IMPACTO AMBIENTAL	35
ANÁLISIS ECONÓMICO	36
BIBLIOGRAFÍA	37

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Objetivo y alcance del proyecto

El presente trabajo tiene como objetivo principal estudiar el escenario de futuro de emisiones RCP 6.0 (del inglés, Representative Concentration Pathway). Este objetivo general se alcanzará a través de tres objetivos específicos:

- Comparar los datos de dos bases de datos en relación a la evolución del forzamiento radiativo, las concentraciones y las emisiones de GHG que definen este escenario.
- Estudiar en base la información contenida en revistas indexadas las características de este escenario así como la metodología utilizada en su elaboración.
- Analizar, para este escenario, la evolución de los factores conductores de las emisiones de CO₂ (es decir, la intensidad de carbono, la intensidad energética, el PIB per cápita y la población) y compararlos con la evolución de estos factores conductores en un escenario tendencial (escenario BAU, del inglés Business as Usual).

Este estudio se centra exclusivamente en el análisis del escenario RCP 6.0. Se acota el alcance del estudio a los tres gases de efecto invernadero que más contribuyen al calentamiento global, el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido de dinitrógeno (N₂O) a nivel mundial total.

1.2. Introducción al cambio climático

Es importante diferenciar entre clima y tiempo, mientras que con tiempo nos referimos a la situación de los factores atmosféricos que actúan en un momento y lugar específicos y, por tanto, puede variar de un día a otro; clima tiene una connotación a más largo plazo. El clima es la estadística del tiempo atmosférico propio de un lugar concreto y con un comportamiento generalmente constante.

Entonces, qué se entiende por cambio climático. De manera natural, la atmosfera que rodea la Tierra contiene gases de efecto invernadero cuya función es absorber parte de la radiación térmica emitida por el Sol para mantener la temperatura media superficial del planeta alrededor de los 15°C haciendo posible la vida. A este proceso se le llama efecto invernadero.

El problema surge a raíz de la actividad humana, desde hace unos siglos y en especial durante las últimas décadas, actividades antropogénicas (principalmente la quema de combustibles fósiles y la deforestación) han modificado la cantidad de GHG en la atmosfera intensificando este fenómeno y

rompiendo el equilibrio térmico que existía entre la absorción de energía térmica proveniente de la radiación solar y la emisión de radiación infrarroja de la Tierra causando el conocido calentamiento global.

Este equilibrio térmico recibe el nombre de balance energético de la Tierra. Globalmente, la superficie del planeta absorbe 161 W/m^2 de energía solar y recibe 342 W/m^2 que sumados resultan 503 W/m^2 . Por otro lado, la Tierra emite un total de 502 W/m^2 (desglosado entre calor sensible, calor latente y energía infrarroja) lo que supone un desequilibrio que oscila alrededor de $0,6 \text{ W/m}^2$ de absorción neta de calor que está provocando el calentamiento de la superficie terrestre (Figura 1).

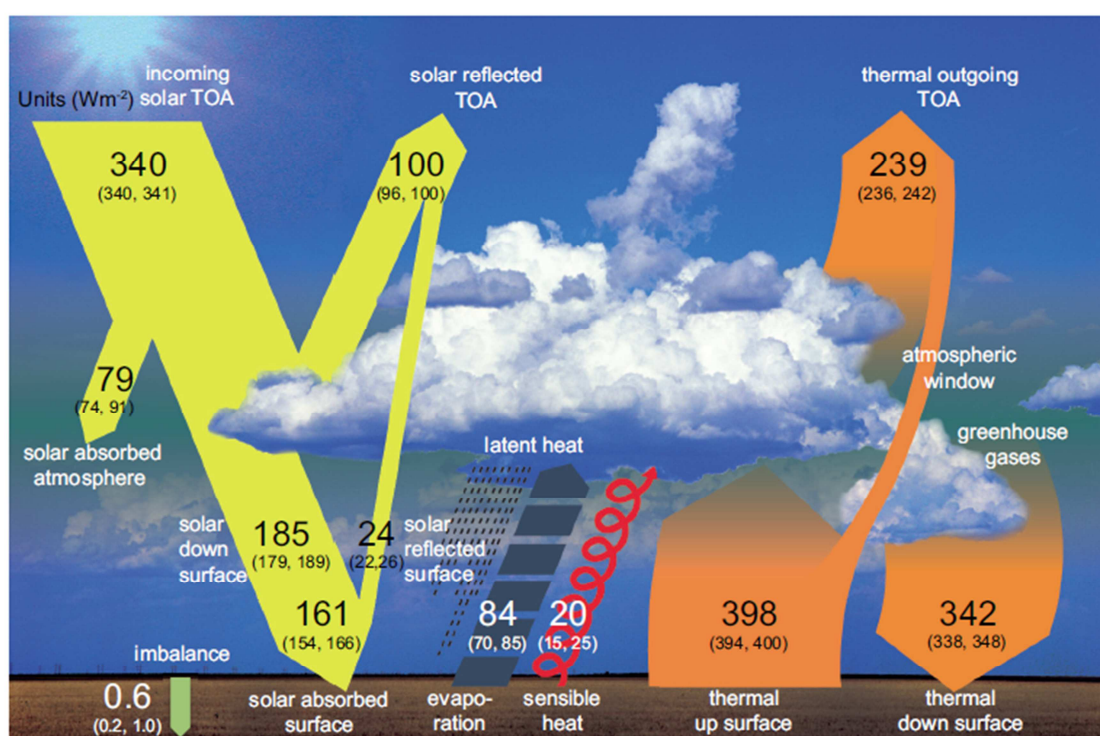


Figura 1. Balance energético medio global en las condiciones climáticas actuales. Fuente: [2]

Los flujos de energía entrante y saliente interactúan en el sistema climático por ese motivo, al haber cambios en los flujos energéticos se puede hablar a la vez de cambio climático. La variación del flujo radiativo se cuantifica mediante el forzamiento radiativo. Por tanto, el forzamiento radiativo se entiende como la unidad de medida de este desequilibrio, esta energía de más absorbida, “la tasa de cambio en el tiempo de la energía por unidad de área del planeta medida en la parte superior de la atmósfera relativos a 1750” [1] cuya unidad es el W/m^2 .

Actualmente el forzamiento radiativo tiene un valor de $2,29 \text{ W/m}^2$, $1,68 \text{ W/m}^2$ de los cuales son contribución del CO_2 [2].

Las consecuencias del cambio climático no sólo repercuten en el clima provocando cambios en las precipitaciones y acentuando los fenómenos meteorológicos extremos sino que también impacta en la sociedad humana, en nuestra manera de vivir, los métodos de transporte, en nuestros modelos económicos provocando desigualdades y migraciones entre otras consecuencias.

Este cambio climático nos obliga a replantear el sistema energético que utilizamos, para frenar el calentamiento global del planeta y llegar a tener la oportunidad de evitar deforestación, extinciones de fauna y flora, desertización, pérdidas de zonas de cultivo, de los hielos de los casquetes polares y de las nieves permanentes de las altas montañas así como desastres naturales varios provocados por huracanes cada vez más potentes, lluvias cada vez más torrenciales y episodios de calor cada vez más largos e intensos [3].

1.2.1. Principales gases de efecto invernadero de origen antropogénico

A continuación se describen los GHG más importantes estudiados en este proyecto, el CO₂ el CH₄ y el N₂O. Se debe aclarar que dentro de este grupo de GHG importantes también se incluyen los gases industriales fluorados: los hidrofluorocarbonos (HFC), los perfluorocarbonos (PFC) y el hexafluoruro de azufre (SF₆).

Los gases fluorados son un conjunto de gases de origen únicamente antropogénico. Son los gases GHG más potentes y de más larga duración en la atmosfera aun así, representan un porcentaje muy bajo del total de las emisiones antropogénicas de GHG, por este motivo no se contemplan (Figura 2).

GHG de larga duración	Tiempo de permanencia en la atmosfera (años)	GWP (en 20 años)	GWP (en 100 años)	% del total de emisiones antropogénicas de GHG
CO ₂		1	1	76%
CH ₄	12,4	84	25	16%
N ₂ O	121	264	265	6%
HFC	1-220	506-10800	138-12400	<2%
PFC	2600-50000	4480-8210	663-11200	<2%
SF ₆	3200	17500	23500	<2%

Figura 2. Tabla resumen de las características de los GHG regulados por el PK. [4]

1.2.1.1. DIÓXIDO DE CARBONO

Es el gas GHG más importante ya que representa más del 75% del total de emisiones. Sus focos de emisión principales son la quema de combustibles fósiles, la producción de cemento, la deforestación y los cambios en el uso del suelo.

Es difícil concretar el tiempo de vida de este gas en la atmósfera ya que responde a su propio ciclo de vida. El ciclo del carbono es un ciclo biogeoquímico donde el carbono se encuentra en continuo intercambio entre la atmósfera, los océanos y la biosfera terrestre.

Las actividades humanas han alterado el ciclo del carbono debido a que las emisiones antropogénicas del gas superan las fluctuaciones naturales. Estos cambios en la cantidad de CO_2 están alterando los patrones climatológicos e indirectamente influyen en la química oceánica.

Los niveles actuales de CO_2 en la atmósfera superan los valores de los últimos 800.000 años y estos están aumentando a un ritmo más rápido de lo que jamás se ha registrado. En el 2014 la concentración de CO_2 era de 397.3 ppm (partes por millón) [5] nivel un 143% superior respecto a valores preindustriales (Figura 3).

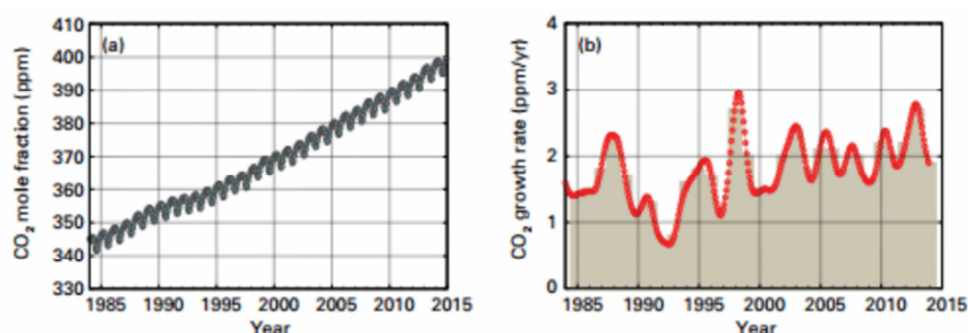


Figura 3. (a) Promedio mundial de la concentración de CO_2 en la atmósfera, (b) Índice de crecimiento del CO_2 . Fuente: [5]

1.2.1.2. METANO

Es el segundo gas GHG más importante y representa más del 15% del total de emisiones. Alrededor del 60% de las emisiones de metano son debidas a actividades humanas tales como la combustión de biomasa, cultivos de arroz y ganadería de rumiantes.

El metano tiene gran efecto por un breve periodo de aproximadamente 10 años. Su concentración en la atmósfera se ha aumentado un 254% respecto la era preindustrial alcanzando el valor de 1833 ppb (partes por billón) en el año 2014 [4].

1.2.1.3. ÓXIDO NITROSO

Es el tercer gas GHG más importante y representa alrededor del 6% del total de emisiones. El 40% de las emisiones de este óxido son debidas a actividades humanas tales como la producción de fertilizantes y algunos procesos industriales.

El óxido nitroso daña severamente la capa de ozono que nos protege de la radiación ultravioleta. Su concentración en la atmosfera se ha aumentado en un 121% desde la era preindustrial alcanzando el valor de 327 ppb en el año 2014 [4].

1.3. Organismos y políticas internacionales acerca del cambio climático

El cambio climático afecta a nivel global a todo el planeta por tanto se precisa de un órgano internacional destinado a este asunto. A escala internacional, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC, del inglés United Nations Framework Convention on Climate Change) es el encargado de promover políticas de mitigación y tomar decisiones para combatir el cambio climático.

La UNFCCC actualmente está formada por 196 partes, donde el conjunto de la Unión Europea actúa como una única parte. Anualmente las partes se reúnen en las llamadas Conferencia de las Partes (COP, del inglés Conference of the Parties) su órgano supremo con capacidad de decisión.

El objetivo de la convención marco es el de *“lograr la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmosfera a un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático y en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, asegurando que la producción de alimentos no se vea amenazada y permitiendo que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible”* [6].

Para conseguir este objetivo, la UNFCCC se apoya de organismos independientes como el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, del inglés Intergovernmental Panel on Climate Change) cuya misión es proveer de evaluaciones científicas llamadas Informes de Evaluación (AR, del inglés Assessment Report) sobre la información científica, técnica y socioeconómica actual acerca del riesgo de cambio climático provocado por la actividad humana y sus potenciales consecuencias.

1.3.1. El Protocolo de Kyoto

El primer tratado importante aprobado por la UNFCCC fue el Protocolo de Kyoto (PK). El PK surge a raíz de la COP3, entró en vigor en 2005 y su objetivo era que los países desarrollados (listados en el Anexo-I de la UNFCCC) redujeran las emisiones de seis GHG en concreto, el CO₂, el CH₄, el N₂O y los gases fluorados HFC, PFC y el SF₆ en un 5% respecto los niveles de 1990 en un primer periodo entre los años 2008-2012.

El PK fue un fracaso ya que algunos países como Estados Unidos no lo llegaron a ratificar, y también porque a partir del 2000 grandes potencias en desarrollo como China e India (que no estaban dentro

del Anexo-I) empezaron un proceso de industrialización acelerado que ha llevado a que en 2010 las emisiones en el mundo fueran ya un 35% superiores a las del 1990 (Figura 4).

En la cumbre de Copenhague del 2009 se trató de acordar un segundo periodo de compromisos del protocolo de Kioto para el periodo 2012-2020. Este segundo periodo nunca ha sido ratificado por la mayoría necesaria para aplicarlo, por lo que en la actualidad y desde el 2012 no existe ningún acuerdo internacional que se esté aplicando en esta materia.

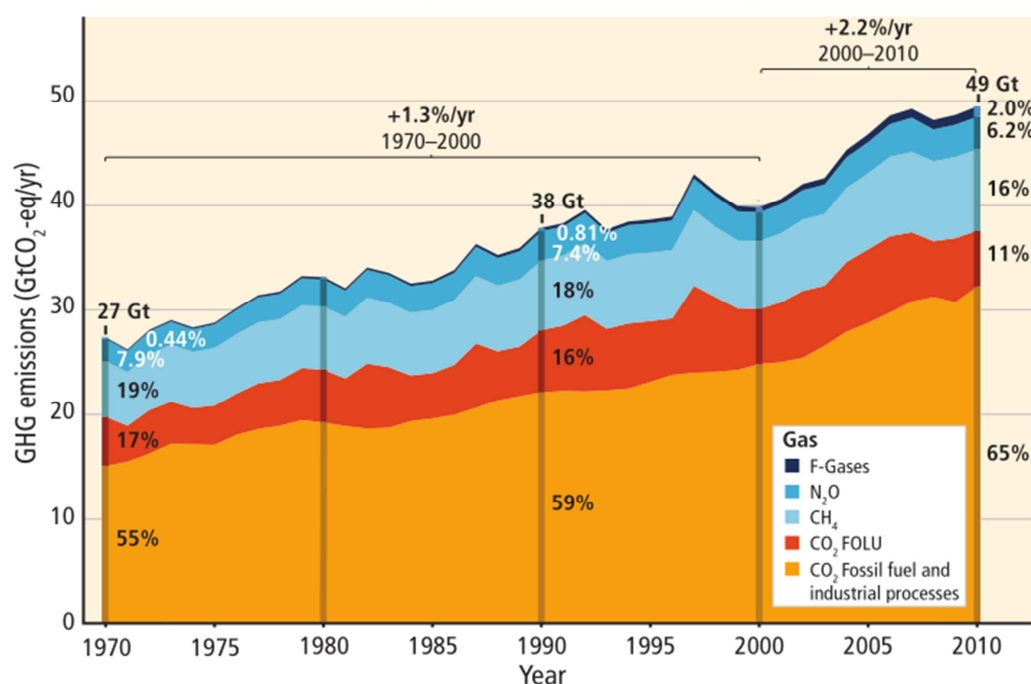


Figura 4. Emisiones totales de GHG de origen antropogénico por gases. Fuente: [2]

1.3.2. El Acuerdo de París

A partir del fracaso del PK se cambia la manera de afrontar la política internacional acerca del cambio climático y en la COP21 (2015) se negocia el Acuerdo de París (PA, del inglés Paris Agreement) que entró en vigor en 2016 y que empezará a implementarse en 2020.

En este nuevo tratado se establecen medidas para la reducción de las emisiones de gases GHG a través de la mitigación para cumplir el objetivo de *“reforzar la respuesta mundial frente la amenaza del cambio climático manteniendo el aumento de temperatura media mundial por debajo de los 2°C respecto niveles preindustriales y proseguir con esfuerzos para limitar este aumento a 1,5°C”* [7] alcanzando lo antes posible el pico de emisiones para posteriormente ser reducidas rápidamente y conseguir un equilibrio entre las fuentes antropogénicas de emisión y absorción de GHG.

La metodología que se presenta en el acuerdo para lograr el objetivo expuesto anteriormente se basa en las Contribuciones Nacionales Previstas (NDCs, del inglés Nationally Determined Contributions).

Las NDCs son los compromisos a nivel nacional de reducción de emisiones de GHG que cada parte del acuerdo está dispuesto a realizar. Las NDCs deben especificar el horizonte de trabajo y cómo se contribuye al objetivo común de los 2°C, la estrategia y el periodo de implementación, punto de referencia y otra información cuantificable sobre mitigación.

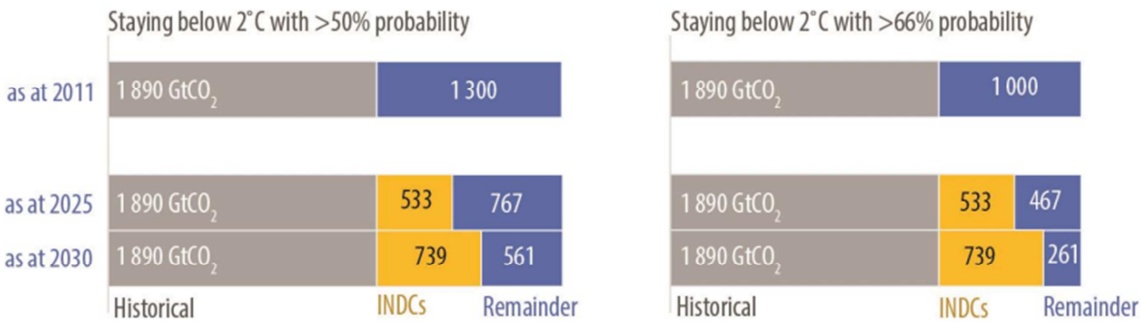
1.3.3. Los informes INDC de la UNFCCC

Anteriormente a las NDCs, en las COPs previas a la COP21 de París, se invitó a las distintas partes a presentar las Contribuciones Previstas y Determinadas Nacionales (INDCs, del inglés Intended Nationally Determined Contributions) que reflejaban la intención de mitigación de GHG de cada país.

En el momento en que se realizó la COP21, 147 partes habían entregado sus INDCs. La preocupación que se presentó en ese momento fue que el análisis de los impactos agregados del conjunto de todas las INCDs mostraba un escenario de futuro muy alejado del objetivo establecido de limitar el calentamiento global en 2°C y que, por tanto, estas contribuciones eran insuficientes.

Para cumplir el objetivo con una probabilidad superior al 66% la cantidad de emisiones acumuladas de CO₂ correspondientes para el 2100 se deben estabilizar entre 0 y 2900 GtCO₂. En el 2011, 1890 GtCO₂ ya se habían emitido, por tanto, de ahí en adelante, solamente se puede emitir las 1000 GtCO₂ restantes. El concepto de emisiones acumuladas que aún se puede emitir con el propósito de cumplir el objetivo de los 2°C se conoce con el término de Global Carbon Budget [2].

Figure 11
Comparison of cumulative CO₂ emissions under different scenarios



Source: Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report scenario database and own aggregation.

Abbreviation: INDCs = intended nationally determined contributions.

Figura 5. Comparación de las emisiones acumuladas de CO₂ según diferentes escenarios. Fuente: [2]

Según el informe sobre el efecto agregado de las INDCs elaborado por la UNFCCC en el 2030 ya se habrán “consumido” 739 GtCO₂ de las 1000 GtCO₂ que aún se pueden emitir restando solamente 261 GtCO₂ [8] [9] (Figura 5).

Analizando el escenario de futuro que sigue la tendencia del efecto agragado de las INDCs, en 2030 nos situaríamos a 14GtCO₂ eq por encima de los valores correspondientes al escenario de los 2°C, llegando al 2100 a un aumento de temperatura de 3,5°C [8] (Figura 6).

El escenario RCP más semejante al escenario de futuro que representa el conjunto de la aplicación de las INDCs es el correspondiente al RCP 6.0 ya que ambos llegan a finales de siglo con un aumento de temperatura semejante, entre 3,5 °C y 4°C. Por este motivo se ha seleccionado este escenario como sujeto de estudio para el presente trabajo.

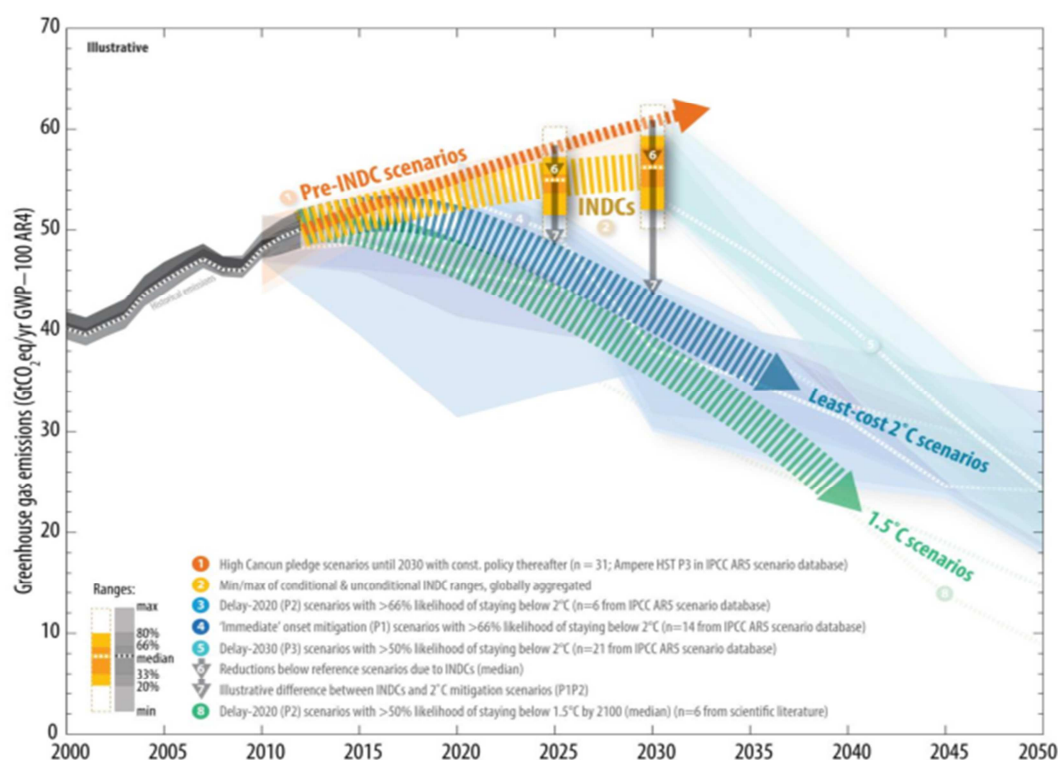


Figura 6. INDCs proyectadas en comparación con las emisiones objetivo para la limitación de temperatura. Fuente: [8]

2. LOS ESCENARIOS RCP

Como se ha dicho anteriormente, el IPCC es una organización internacional que publica informes de evaluación científica actualizada relevante al cambio climático inducido por la actividad humana, su impacto y las posibles opciones de adaptación y mitigación. A continuación se contextualizan estos escenarios y se describe su evolución a lo largo de los años.

2.1. Antecedentes. Los escenarios SRES

En el Cuarto Informe de Evaluación (AR4) del IPCC se presentaron los escenarios SRES (del inglés Special Report on Emissions Scenarios). Estos se dividían en cuatro familias: A1, A2, B1 y B2 que incorporaban distintas alternativas de desarrollo según los agentes económicos, demográficos y tecnológicos establecidos.

El principio de estos escenarios era la relación que presentaba las concentraciones de CO₂ en la atmosfera con el incremento de temperatura a lo largo del siglo XXI respecto los niveles de la era preindustrial.

El problema con estos escenarios fue que las concentraciones de CO₂ en la atmosfera dependen del sistema climático y del ciclo del carbono, por tanto, no son controlables de forma directa por los países a partir de sus emisiones. Como consecuencia, los escenarios SRES no daban a los países las herramientas suficientes para poder establecer objetivos claros de mitigación con el fin de alcanzar el objetivo global de limitar el aumento de temperatura de la superficie terrestre.

En el caso particular que nos ocupa, el escenario de referencia del RCP 6.0 se corresponde con el escenario SRES B2. El SRES B2 escenifica un mundo con una tasa de crecimiento de población lenta, niveles de desarrollo económico intermedios y un cambio tecnológico lento. La sociedad prioriza soluciones de ámbito local y regional dirigidas a la protección ambiental y la equidad social.

2.2. Los escenarios RCP del AR5

En el último informe del IPCC, el Quinto Informe de Evaluación (AR5), se presentan los nuevos escenarios de emisiones y concentraciones de gases de efecto invernadero que proporcionan un conjunto de datos único que cubre desde el periodo preindustrial hasta el siglo XXI. Se presentan un total de cinco escenarios. Éstos son el RCP2.6, RCP4.5, RCP 6.0 y el RCP8.5 que derivan su nombre del

posible rango de valores de forzamiento radiativo que se alcance en 2100. Cada uno de estos escenarios está asociado a un nivel de concentración de CO₂ en la atmosfera.

Los cuatro RCPs se basan en escenarios de emisión de gas múltiples únicamente de origen antropogénico y se están utilizando para impulsar simulaciones de modelos climáticos planificados como parte del Quinto Proyecto de Intercomparación de Modelos Combinados (CMIP5) del Programa Mundial de Investigación Climática [10].

Lo innovador que incluyen estos nuevos escenarios es el concepto de emisiones acumuladas de CO₂. Los escenarios RCP relacionan de forma directa la cantidad de emisiones acumuladas de CO₂ en la atmosfera con los respectivos aumentos de temperatura.

2.3. El escenario RCP 6.0

Como se ha comentado con anterioridad, el presente trabajo se centra exclusivamente en el análisis del escenario RCP 6.0 de futuro de emisiones de GHG.

El RCP 6.0 es un escenario de intervención de política climática que contempla emisiones globales de GHG a largo plazo, especies de vida corta y cambios en el uso del suelo con el propósito de estabilizar el forzamiento radiativo a 6 W/m² en el año 2100 sin exceder este valor en años anteriores. Sin políticas explícitas designadas para reducir las emisiones el forzamiento radiativo superaría el límite de 6 W/m² para el 2100 [11].

El escenario de futuro RCP 6.0 se referencia en el SRES B2 un escenario que no contempla intervenciones políticas cuyas características principales se han definido en el apartado anterior.

2.3.1. Modelo integrado AIM

El escenario de futuro RCP 6.0 se desarrolla dentro del modelo marco AIM (del inglés, Asian-Pacific Integrated Model) que pretende simular la interacción de los gases entre la atmosfera y el ecosistema terrestre, la evolución de la realidad socio-económica del mundo y su población.

El modelo AIM, es el resultado de la combinación de varios modelos más simples que tratan temas más específicos: modelo político (AIM/Impact [Policy]), modelo global (AIM/CGE [Global]), modelo de uso del suelo, modelo de emisiones y modelo de ecosistemas (VISIT) (Figura 7).

Aun con este desglose el modelo es muy complejo, a continuación se comenta por encima cada modelo especificando sus principales consignas. Para un conocimiento más profundo, en Masui et al. 2011 se desarrolla con detalle todo el proceso de creación del modelo.

2.3.1.1. AIM/Impact [Policy]

Formado por un modelo de optimización dinámico acoplado a un modelo climático simple. Agrupa las actividades económicas mundiales en un producto final que puede ser consumido para producir trabajo o bien asignarlo como inversión.

Define las emisiones como un subproducto del uso energético y la producción agregada. Estas son posteriormente traducidas a composición atmosférica y forzamiento radiativo mediante una representación agregada de la atmosfera y el ciclo de carbono.

Este modelo se ejecuta con la primicia de maximizar la producción mundial a partir del consumo energético sujeto a no sobrepasar el límite de 6 W/m^2 de forzamiento radiativo. Como resultado se obtiene un escenario óptimo de emisiones del RCP 6.0 que posteriormente se introduce como restricción en el modelo global.

2.3.1.2. AIM/CGE [Global]

Es un modelo de equilibrio general computable (CGE) que se desglosa en 24 regiones geográficas y produce para cada una 21 parámetros económicos de bienes y servicios [11].

El modelo contempla que la electricidad pueda ser generada a partir de centrales térmicas, hidráulicas, nucleares y fuentes de energías renovables (biomasa y solar). Dentro de las centrales térmicas se incluye el tipo IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle) que se asume serán capaces de capturar y almacenar el CO_2 .

El modelo contempla como recursos el carbón, el petróleo crudo y el gas natural limitando su producción a una vida finita. De la misma manera, la producción agrícola, de ganado, materia forestal y biomasa se limita con un algoritmo de uso y cambios del suelo, un recurso también finito, combinado con un modelo económico.

El modelo asigna las emisiones (exportadas del modelo político) a las distintas regiones siguiendo el camino marcado por el escenario de futuro de emisiones globales de GHG del RCP 6.0 en proporción a su población en el 2050 y años posteriores. Entre el 2001 y 2050 las emisiones se designan siguiendo una interpolación lineal entre el valor del 2001 y el límite establecido para el 2050.

2.3.1.3. Modelo uso del suelo

Modelo que proporciona escenarios sobre el uso del suelo para las 24 regiones. Los datos de las regiones se reducen de escala para trabajar con celdas.

El modelo contempla ocho categorías de suelos. En la Figura 8 se puede ver la correlación con los tipos de suelo que contempla el modelo global.

Los escenarios de futuro de distribución espacial se crean asumiendo que las áreas urbanas aumentarían en proporción al crecimiento de la población y del PIB de cada región.

2.3.1.4. Modelo de emisiones

Igual que en el modelo de uso del suelo, los datos de las regiones se reducen de escala para trabajar con celdas.

Parte de un mapa inicial que se actualiza anualmente a partir de unos proxys que relacionan las emisiones con el cambio de uso del suelo. Cuando una celda da emisiones negativas se le asigna un cero y se descuenta estas emisiones de otra celda que tenga un valor positivo.

2.3.1.5. VISIT (Vegetation Integrative Simulator for Trace Gases)

Modela el intercambio de CO₂ entre la atmósfera y los ecosistemas terrestres a través de la fotosíntesis y la respiración, flujos de carbono causados por el uso del suelo y la quema de biomasa, emisiones de metano, emisiones de componentes orgánicos volátiles y la pérdida de carbono a causa de la erosión [11].

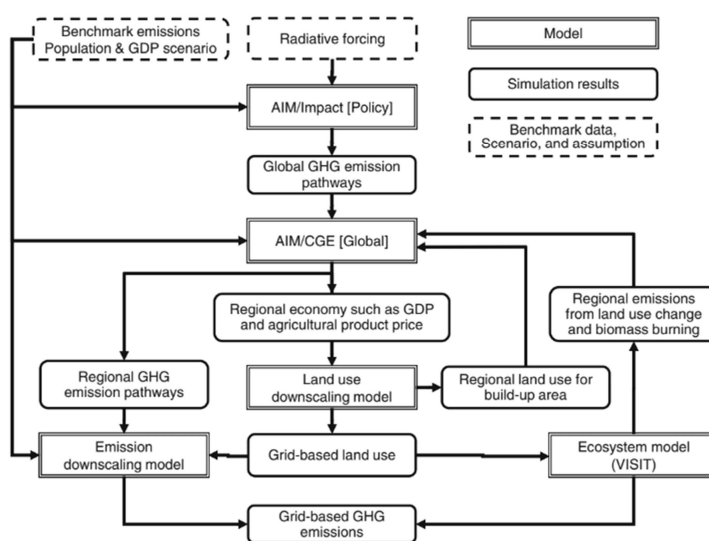


Figura 7. Estructura de los componentes usados en el modelo AIM para desarrollar el RCP 6.0. Fuente [11]

Categories in AIM/CGE [Global] model	Categories in the land use downscaling model
Cropland	Bio-fuel cropland Other cropland
Forest	Managed forest Unmanaged forest
Grassland+	Pasture Natural grassland
Built-up	Built-up
Other	Other

Figura 8. Categorías de tipo de suelos contemplados en el modelo de uso del suelo. Fuente: [11]

2.3.2. Principales características del escenario de futuro RCP 6.0

En el quinto informe de evaluación (AR5) del IPCC se muestran los resultados y las perspectivas del escenario de futuro de emisiones RCP 6.0 surgidas de la ejecución del modelo AIM. A continuación se señalan las principales características de este escenario.

Según los resultados mostrados en el AR5, como datos generales se espera que para el escenario RCP 6.0, la concentración de CO₂ equivalente se mantenga dentro de un rango de 720-1000 ppm y que el cambio de temperatura a finales de siglo sea un aumento de 4°C en un rango de probabilidad del 66% al 100% (Figura 9).

CO ₂ eq Concentrations in 2100 [ppm CO ₂ eq] Category label (concentration range) ⁹	Subcategories	Relative position of the RCPs ⁵	Cumulative CO ₂ emissions ⁵ [GtCO ₂]		Change in CO ₂ eq emissions compared to 2010 in [%] ⁶		Temperature change (relative to 1850–1900) ^{5, 6}					
			2011–2050	2011–2100	2050	2100	2100 Temperature change [°C] ⁷	Likelihood of staying below temperature level over the 21st century ⁸				
								1.5°C	2.0°C	3.0°C	4.0°C	
< 430	Only a limited number of individual model studies have explored levels below 430 ppm CO ₂ eq											
450 (430–480)	Total range ^{1, 10}	RCP2.6	550–1300	630–1180	–72 to –41	–118 to –78	1.5–1.7 (1.0–2.8)	More unlikely than likely	Likely	Likely	Likely	
500 (480–530)	No overshoot of 530 ppm CO ₂ eq		860–1180	960–1430	–57 to –42	–107 to –73	1.7–1.9 (1.2–2.9)		More likely than not			
	Overshoot of 530 ppm CO ₂ eq		1130–1530	990–1550	–55 to –25	–114 to –90	1.8–2.0 (1.2–3.3)		About as likely as not			
550 (530–580)	No overshoot of 580 ppm CO ₂ eq		1070–1460	1240–2240	–47 to –19	–81 to –59	2.0–2.2 (1.4–3.6)		Unlikely			More unlikely than likely ¹²
	Overshoot of 580 ppm CO ₂ eq		1420–1750	1170–2100	–16 to 7	–183 to –86	2.1–2.3 (1.4–3.6)					
(580–650)	Total range	RCP4.5	1260–1640	1870–2440	–38 to 24	–134 to –50	2.3–2.6 (1.5–4.2)	Unlikely	More likely than not	More unlikely than likely		
(650–720)	Total range		1310–1750	2570–3340	–11 to 17	–54 to –21	2.6–2.9 (1.8–4.5)					
(720–1000)	Total range	RCP6.0	1570–1940	3620–4990	18 to 54	–7 to 72	3.1–3.7 (2.1–5.8)	Unlikely ¹¹	Unlikely	More unlikely than likely		
> 1000	Total range	RCP8.5	1840–2310	5350–7010	52 to 95	74 to 178	4.1–4.8 (2.8–7.8)		Unlikely ¹¹	Unlikely	More unlikely than likely	

Figura 9. Características principales de los escenarios evaluados en el AR5. Fuente: [2]

2.3.2.1. Previsiones de futuro de las emisiones

Solamente se comentarán los escenarios de futuro para los tres gases principales responsables del calentamiento global, CO₂, CH₄ y N₂O.

Las emisiones de CO₂ aumentan hasta un pico que se sitúa alrededor del año 2060 en valores de 17,7 GtC y en adelante estas se disminuyen llegando a 13 GtC en el 2100. La mitigación de emisiones de CO₂ es el resultado del aumento de la presencia en el sector energético de las fuentes renovables y de una transición de uso del carbón a uso del gas junto con la aplicación de la tecnología CCS (Carbon Capture and Storage) en las centrales térmicas.

Aunque las emisiones globales de CO₂ en 2100 son menos de la mitad que en el escenario de referencia en el mismo año, son 1,8 veces superiores a las emisiones que había en el 2000. La cantidad de emisiones reducidas acumuladas de CO₂ durante el siglo XXI entre la referencia y el escenario de futuro del RCP 6.0 es de 463 GtC.

Teniendo en cuenta ahora una visión regional de las emisiones de CO₂ destaca el gran aumento de emisiones provenientes del continente asiático a causa de su rápido crecimiento económico durante las próximas décadas. Como consecuencia, para el 2100 Asia será responsable de más del 60% de las emisiones de CO₂. Durante el mismo periodo las emisiones derivadas de los países de la OECD (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos) se reducen año tras año y a partir del 2070 a mayor ritmo (Figura 10).

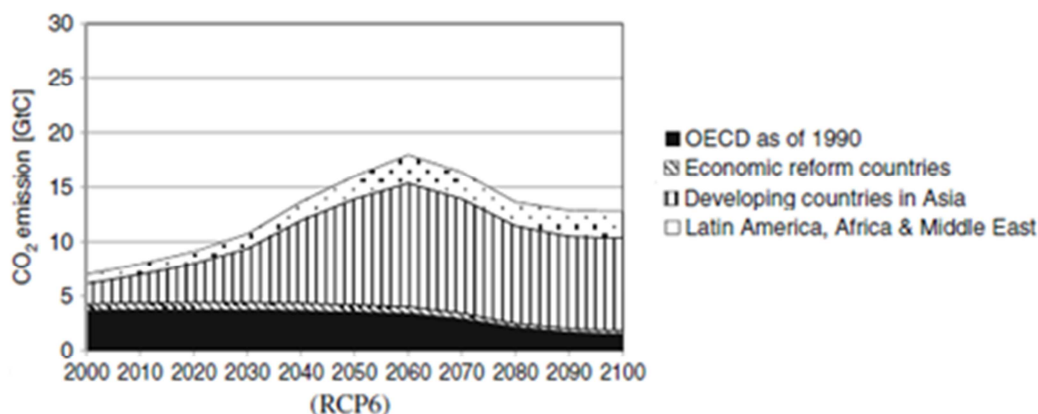


Figura 10. Emisiones de CO₂ según las regiones de SRES. Fuente: [11]

En cuanto a las emisiones de CH₄ y de N₂O también presentan un pico en el 2060 y a partir de ahí disminuyen. En el caso del N₂O destacar que en 2100 las emisiones serán un 55% superior en referencia al año 2000. El aumento de emisiones de estos gases GHG son principalmente a causa de los cambios de uso del suelo [11].

2.3.2.2. Previsiones de futuro para el consumo de energía

En números de consumo de energía primaria, se estima que para el 2100 se consuman 838 EJ al año [11]. Analizando por tipos de energía (Figura 11a), destacar la evolución del consumo del carbón donde se prevé que aumente su consumo a partir del 2030 hasta alcanzar un pico en el 2060 (pico coincidente con el de emisiones, el factor de emisión del carbón es el más alto de ahí su correlación) para después descender hasta niveles de principios de siglo.

Paralelamente, las demás fuentes de energía aumentarán su presencia en el vector energético. El gas será la principal fuente de energía seguida del petróleo y el carbón. Las energías renovables aumentarán ligeramente su presencia especialmente durante las últimas décadas.

Teniendo en cuenta el consumo por regiones, Asia, los países de América Latina y África son los que más aumentarán su consumo. Para el 2100 solo Asia será responsable de más del 50% del consumo de energía primaria y contando el conjunto de las tres regiones representarán más del 75% del consumo mundial (Figura 11b).

Pasando a continuación al análisis de la energía final (Figura 11c), la electricidad es la forma de energía final que más crece llegando a representar casi el 50% del total de energía final consumida. A la vez, los combustibles sólidos son los únicos que disminuyen. Teniendo en cuenta el consumo por regiones, lógicamente, igual que pasaba con el consumo de energía primaria, Asia es el mayor consumidor de energía final con los mismos porcentajes.

Por último, si se analiza el origen de esta energía secundaria mayoritaria, la electricidad, y la vez se compara este gráfico (Figura 11d) con el gráfico de consumo de energía primaria (Figura 11a), se puede ver como aproximadamente la mitad del consumo primario se destina a la producción eléctrica.

En el 2100 el gas será la fuente de energía principal utilizada para producir electricidad representando un 40%. Prácticamente todo el gas consumido se destina a este fin.

La segunda fuente de energía primaria será el carbón con un 20% y aproximadamente la mitad del consumo total de carbón se destinará a este fin. Analizando el consumo de carbón durante todo el siglo, se observa como de nuevo se presenta un pico en el año 2060. En el 2060 el carbón será la fuente de energía principal para a producción de electricidad y será substituido por el gas en las décadas posteriores.

Este cambio en el modelo energético es debido a que el escenario RCP 6.0 contempla una etapa de descarbonización a partir de este año pico. Aun así, el consumo energético no para de aumentar, por este motivo, el gas cada vez tendrá más protagonismo como queda reflejado en la Figura 11d.

Fijándonos ahora en las fuentes de energía renovable y nuclear cada vez su presencia en el sector eléctrico es mayor llegando a representar más del 30% en el 2100. Se puede asumir que la totalidad de esta energía primaria se destina a la producción de electricidad. Como resultado de esta mayor presencia de fuentes renovables junto con la aplicación de la tecnología CCS en el 74% de las centrales térmicas las emisiones de CO₂ derivadas de la producción de electricidad se reducen.

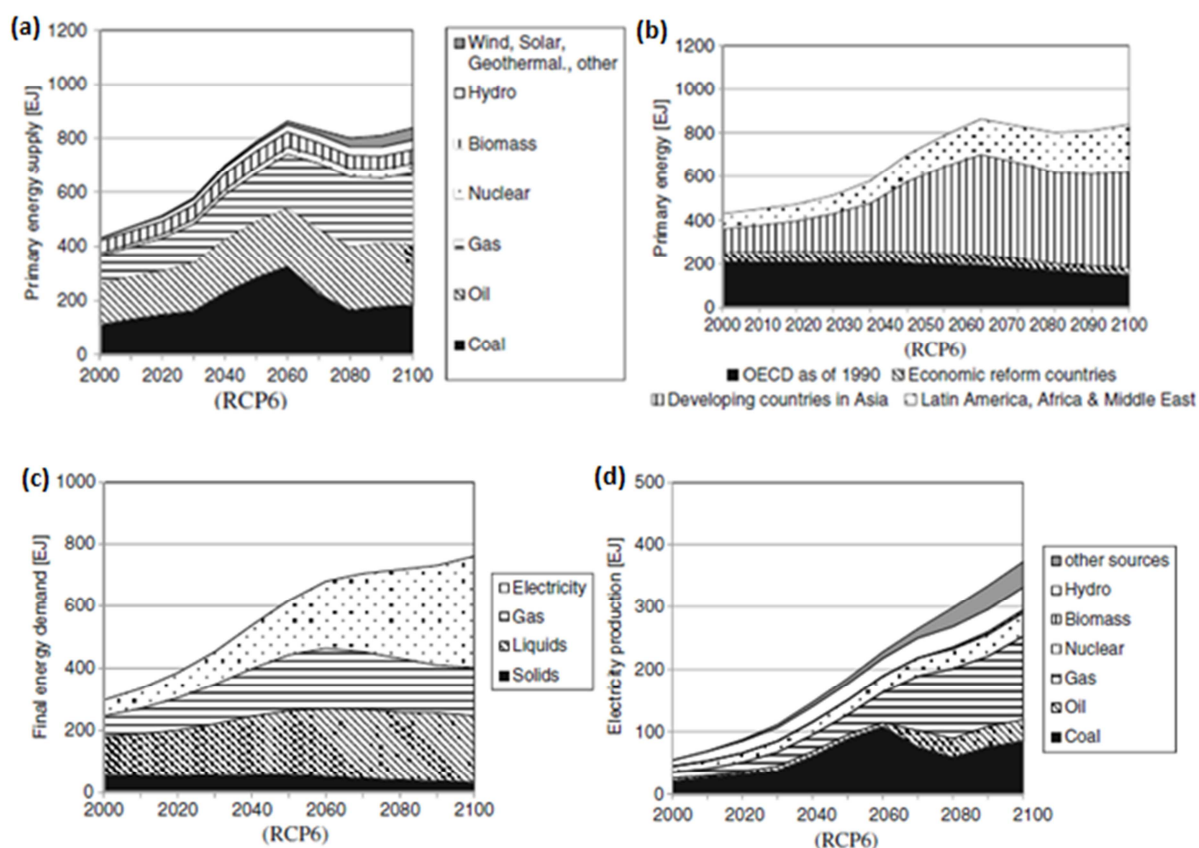


Figura 11. (a) Consumo de energía primaria por fuentes. (b) Consumo de energía primaria por regiones. (c) Consumo energía final por tipo de energía. (d) Generación de electricidad según fuente. Fuente: [11]

2.3.2.3. Previsiones de futuro de cambios en el uso del suelo

A lo largo del siglo XXI los cambios del uso del suelo son consecuencia principal del aumento de población y de nivel económico y por tanto, también del aumento de la demanda de alimento. Para un análisis más profundo y concreto sobre los cambios del uso del suelo a nivel mundial ir a la referencia Hurtt et al. 2011.

Para el escenario de futuro RCP 6.0 se prevé un crecimiento en las áreas urbanas y en los cultivos en un 26%. Las zonas forestales también aumentan pero a menor ritmo mientras que los pastos disminuyen en un 10% [12]. Esta reducción en las zonas de pasto disminuye la tasa de expansión del

ganado y por tanto repercute en las emisiones de CH₄ que derivan de éste disminuyendo su emisión (Figura 12).

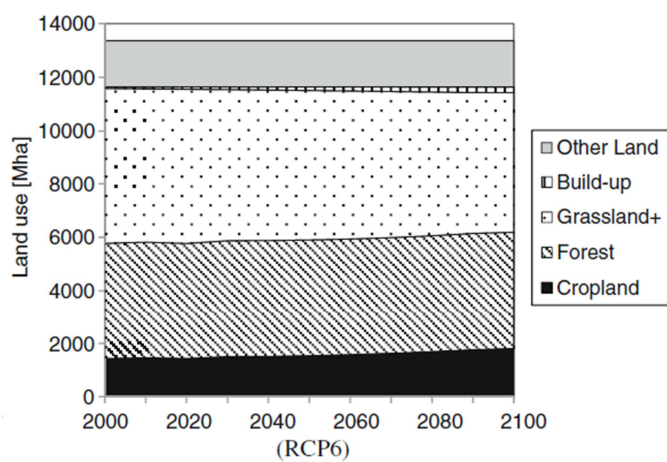


Figura 12. Cambios en el uso del suelo. Fuente [11]

3. DATOS DEL ESCENARIO RCP 6.0

Los siguientes apartados describen el procedimiento seguido durante este análisis del escenario de futuro de emisiones RCP 6.0. Primero se realiza una selección de bases de datos y una posterior comparación de los escenarios de futuro para el forzamiento radiativo, emisiones y concentración de gases. Se termina aplicando la Identidad de Kaya en periodos cada diez años para extraer una interpretación de la evolución del escenario a lo largo de este siglo.

3.1. Bases de datos

Para este análisis se extraen valores de dos bases de datos: el Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK) y el International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA).

El motivo de utilizar varias fuentes es el de compararlas entre ellas para confirmar que ambas llevan a los mismos pronósticos. Otra particularidad de estas bases de datos es la escala de tiempo, los datos de IIASA comprenden únicamente el siglo XXI en periodos de 10 años mientras que en el Potsdam abarca desde la época preindustrial hasta el 2300 en intervalos anuales. Por tanto se puede apreciar mejor la evolución de los distintos parámetros a lo largo del tiempo y con más detalle.

El estudio se centra en la evolución del forzamiento radiativo, las emisiones y las concentraciones de CO₂, CH₄ y N₂O durante el siglo XXI. Se hace ésta selección ya que son los gases con mayor contribución al aumento del forzamiento radiativo.

Para poder hacer comparaciones entre los valores de las emisiones de los diferentes gases, se convierten las unidades a mega toneladas de dióxido de carbono equivalente anuales (MtCO_{2 eq}/año). Se cogen los valores de Global Warming Potentials (GWP) a 100 años presentados en el AR4 para realizar la conversión (Figura 13).

Industrial Designation or Common Name (years)	Chemical Formula	Lifetime (years)	Radiative Efficiency (W m ⁻² ppb ⁻¹)	Global Warming Potential for Given Time Horizon			
				SAR [†] (100-yr)	20-yr	100-yr	500-yr
Carbon dioxide	CO ₂	See below ^a	^b 1.4x10 ⁻⁵	1	1	1	1
Methane ^c	CH ₄	12 ^c	3.7x10 ⁻⁴	21	72	25	7.6
Nitrous oxide	N ₂ O	114	3.03x10 ⁻³	310	289	298	153

Figura 13. Global Warming Potential para los principales gases GHG. Fuente: [1]

Las siguientes figuras muestran los resultados de la comparativa entre las bases de datos.

Representando la evolución de la concentración de CO₂, CH₄ y N₂O en la atmosfera (Figura 14) se puede ver como ambas bases de datos coinciden en la evolución que siguen los tres gases de efecto invernadero hasta finales de siglo. Los tres GHG tienen tendencia ascendente hasta finalmente estabilizar su valor unas décadas después del 2100.

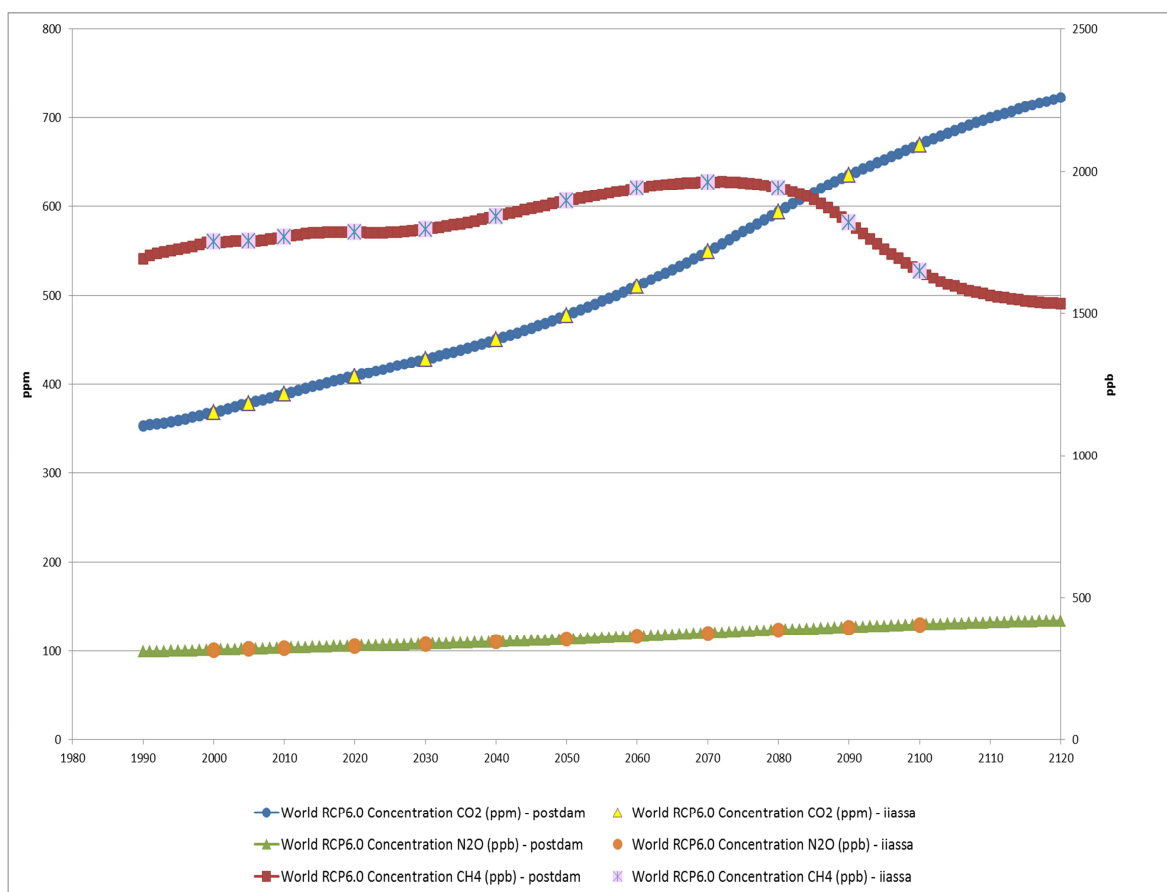


Figura 14. Comparación de la evolución de la concentración de los principales GHG según la base de datos. Fuente: Propia

En el caso del N₂O inicia el siglo con una concentración de 315 ppb y se prevé un crecimiento lento y constante hasta estabilizarse alrededor de los 420 ppb. Lo contrario sucede con el CO₂, que muestra una pendiente de crecimiento más pronunciada empezando el siglo cerca de 370 ppm y terminándolo en niveles de 750 ppm. Por último, mirando el comportamiento del CH₄, empieza el siglo aumentando sus niveles de concentración en la atmosfera de 1750 ppb hasta 1960 ppb y a finales de siglo se prevé un brusco descenso y una posterior estabilización cerca de 1500 ppb.

Comparando las contribuciones de cada gas de efecto invernadero al forzamiento radiativo total (Figura 15) ambas bases coinciden con la tendencia de crecimiento y con el peso que representa cada gas respecto el conjunto.

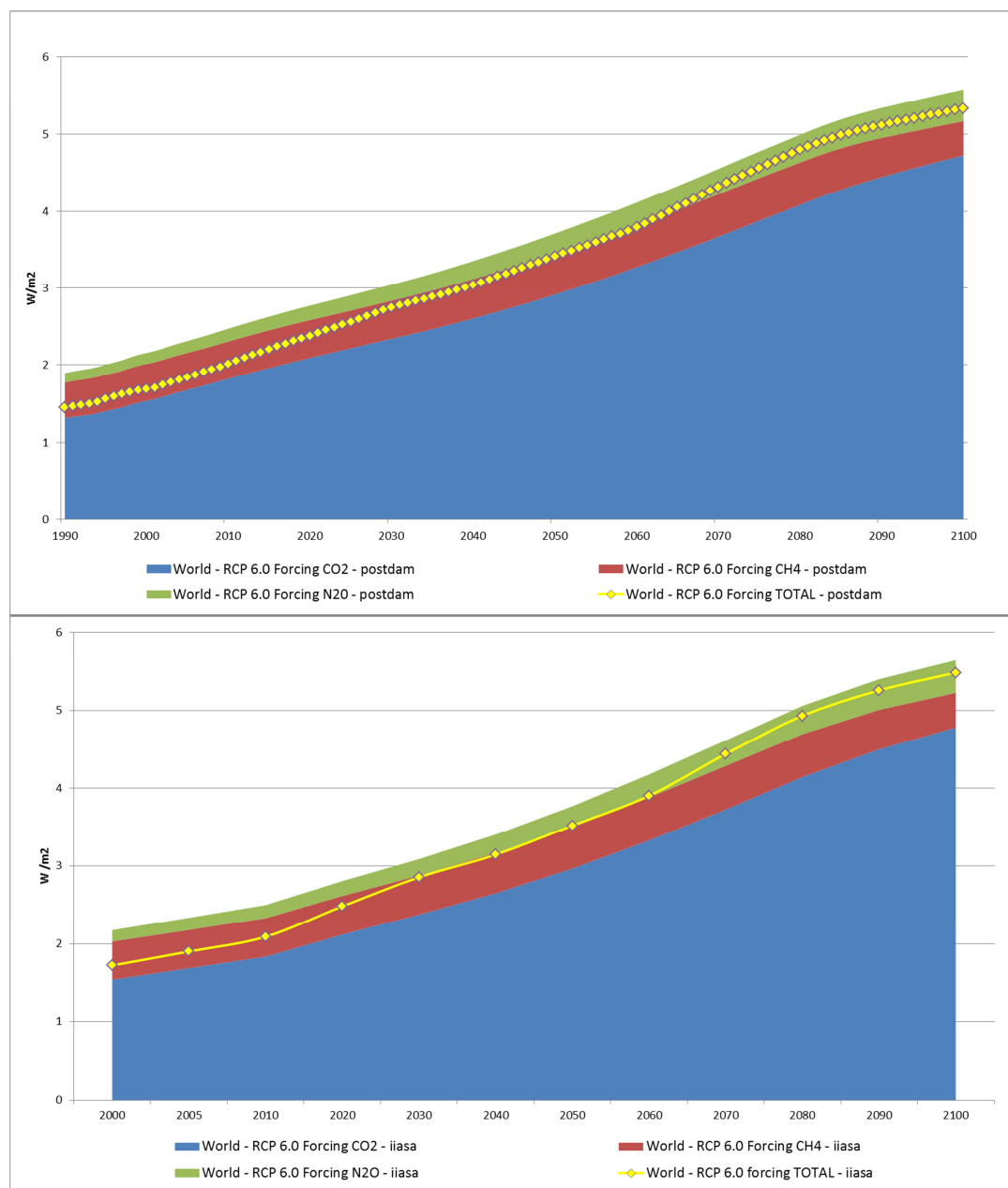


Figura 15. Comparación de las contribuciones de los principales GHG al forzamiento radiativo según la base de datos.
Fuente: Propia.

El CO_2 es el máximo responsable del aumento del forzamiento radiativo, es el que más peso tiene y también es el que más crece. Llega a ser causa de $4,78 W/m^2$ de forzamiento representando más del 87% del total. Se estabiliza en valores alrededor de los $5,9 W/m^2$ cumpliendo la premisa de este escenario RCP 6.0 de no superar los $6 W/m^2$ en el 2100.

Por otro lado, el CH_4 y el N_2O a finales de siglo representan cada uno aproximadamente el 8% del forzamiento radiativo. La contribución del metano es prácticamente constante alrededor de $0,5 W/m^2$ mientras que el N_2O aumenta desde $0,15 W/m^2$ hasta $0,4 W/m^2$.

Finalmente, analizando la comparación de los valores de emisiones de GHG (Figura 16) destaca que hay coincidencia en la evolución del CO₂ y el CH₄ pero en cambio en el caso del N₂O hay cierta diferencia. Curiosamente, el perfil de evolución en los dos casos es el mismo pero los valores de la bases de datos de IIASA están ligeramente por encima de los valores de Potsdam.

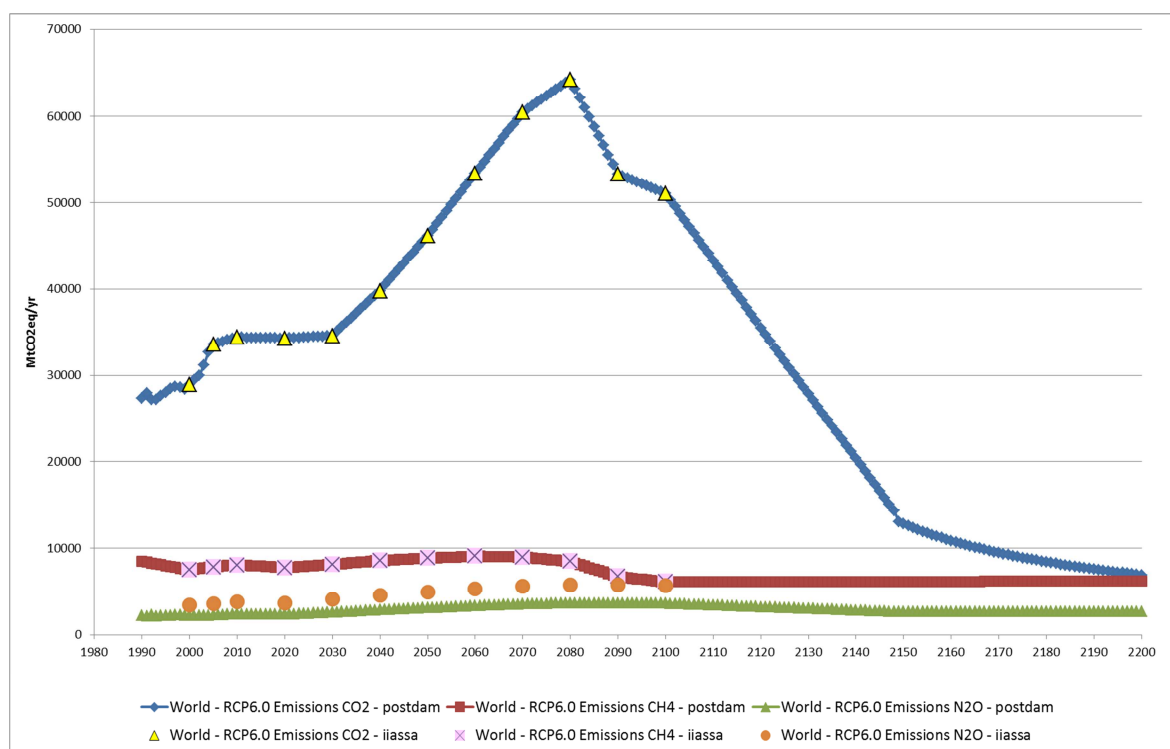


Figura 16. Comparación de la evolución de las emisiones de los principales GHG según la base de datos. Fuente: Propia

En el caso de los tres gases, la evolución es la siguiente: se prevé un aumento de las emisiones que tendrá un pico alrededor de la década del 2070-2080 y posteriormente empezará a descender hasta estabilizar los niveles de emisión en el próximo siglo.

Se puede observar como el principal gas que se emite es el CO₂ con diferencia. Este muestra una curva de crecimiento cambiante. Se podría considerar que en la década actual las emisiones se estabilizan pero la predicción para los años siguientes muestra una tendencia de crecimiento con una pendiente bastante pronunciada que se mantiene hasta el 2080 donde se prevé que se llegará a valores de emisión pico de 65.000 MtCO₂ anuales.

Posteriormente se prevé una reducción drástica de las emisiones que se alargará hasta casi un siglo estabilizando las emisiones de CO₂ a 4.500 MtCO₂ anuales. Esto representaría una reducción del 93 % de las emisiones (en referencia al valor pico) y una reducción del 47% de las emisiones (en referencia al valor actual).

3.2. Simulación MERGE_EMF27

Otro punto que se analiza es la realidad socio-económica y evolución de la población a nivel mundial.

La base de datos utilizada en este caso es la IIASA ya que abarca un periodo más amplio. Concretamente, los datos extraídos pertenecen a la simulación MERGE_EMF27 – EMF27 – FP – Full Tech.

Para escoger la simulación más adecuada se hizo una preselección de simulaciones que presentaran una evolución del forzamiento radiativo durante el periodo 2000 – 2100 semejante a la correspondiente al escenario RCP 6.0 con una variación máxima del 7%.

Finalmente se escogió la MERGE_EMF27 – EMF27 – FP – Full Tech porque al comparar también la evolución de las emisiones y la concentración de CO₂ con los valores del RCP 6.0 ésta no presentaba variaciones mayores al 10%.

A partir de esta fuente de datos, se extrae los niveles de población, consumo de energía primaria y producto interior bruto (PIB) para determinar la Identidad de Kaya.

4. METODOLOGÍA Y RESULTADOS

4.1. Introducción a la Identidad de Kaya

La Identidad de Kaya es una expresión matemática desarrollada por Yoichi Kaya, un economista energético japonés. Fue presentada por primera vez en Tokyo del 1993 en la conferencia “Global Environment, Energy, and Economic Development”.

La energía y sus emisiones derivadas están interrelacionadas con el resto de actividades que realiza la humanidad. Entre las principales variables que impulsan las emisiones se encuentra: la cantidad de población, la economía, los recursos, la tecnología y las políticas públicas. Esta fórmula matemática relaciona las emisiones de CO₂ con factores que reflejan la realidad socioeconómica y energética de la región de estudio.

Existe dos formas de escribir la Identidad de Kaya, una primera (Eq. 4.1) según las variables mencionadas anteriormente y otra segunda (Eq. 4.2) según los cocientes entre estas variables, conocidos como factores conductores.

$$CO_2 = \frac{CO_2}{Energía} * \frac{Energía}{PIB} * \frac{PIB}{Población} * Población \quad (Eq. 4.1)$$

Dónde:

- CO₂ = Cantidad de CO₂ emitido a la atmosfera en un lugar determinado.
- Energía = Consumo de energía primaria en un lugar determinado.
- PIB = Producto interior bruto en un lugar determinado.
- Población = Número total de población en un lugar determinado.

$$CO_2 = ic * ie * g * Población \quad (Eq. 4.2)$$

Dónde los factores conductores son:

- ic (Intensidad de carbono) = Es el cociente entre la cantidad de CO₂ emitido por cada fuente de energía consumida y/o producida, dividido por la energía primaria total consumida.
- ie (Intensidad energética) = Es el cociente entre la energía primaria total consumida dividido por el PIB de la zona.
- g = Es el cociente entre el PIB de la zona y su población. Representa el nivel de actividad económica en un lugar determinado medido por el PIB per cápita.

En definitiva, las emisiones de CO₂ se definen con una simple ecuación que resulta ser el producto de la población por la renta per cápita por la intensidad energética y por la intensidad de carbono. Pero aunque matemáticamente resulte fácil de operar establece una relación compleja.

La población es un factor importante ya que a más personas, más necesidades, más demanda de energía y más emisiones. A parte, sigue una tendencia creciente difícil de modificar con lo que esta característica puede resultar un inconveniente a la hora de presentar iniciativas de mitigación.

La renta per cápita mide la producción económica de la zona siendo un indicador de riqueza de sus habitantes. A mayor economía se entiende también mayor consumo energético y por tanto más emisiones.

La intensidad energética es un indicador de la eficiencia energética. A medida que se desarrolla nuevas tecnologías se mejora su eficiencia y por tanto, se espera un menor consumo energético para producir el mismo trabajo. Esto se puede traducir a: “menos energía para incrementar el PIB”.

La intensidad de carbono refleja el vector energético de un lugar determinado. A medida que se desarrollan y se implantan energías renovables y/o alternativas que mejoren la eficiencia, este factor disminuye. Es decir, a menor intensidad de carbono menos emisiones en la producción o consumo de energía.

En este documento, se utiliza la Identidad de Kaya para estudiar la evolución tanto de las emisiones de CO₂ como de sus factores conductores a lo largo de este siglo. También se hace el análisis de sus tasas de variación.

4.2. Análisis del escenario RCP 6.0 en base a la Identidad de Kaya

4.2.1. Evolución de las emisiones, el consumo energético, el PIB y la población

Antes de aplicar directamente la Identidad de Kaya se realiza un análisis previo de sus factores conductores por separado.

Como se ha comentado con anterioridad, éstos son las emisiones de CO₂, el consumo de energía primaria, el producto interior bruto y la población mundial.

La evolución final en todos los factores comparando el estado inicial a principios de siglo con el estado final a finales de siglo es que en todos ellos se observa un aumento de sus niveles correspondientes independientemente del ritmo en que éste se produzca.

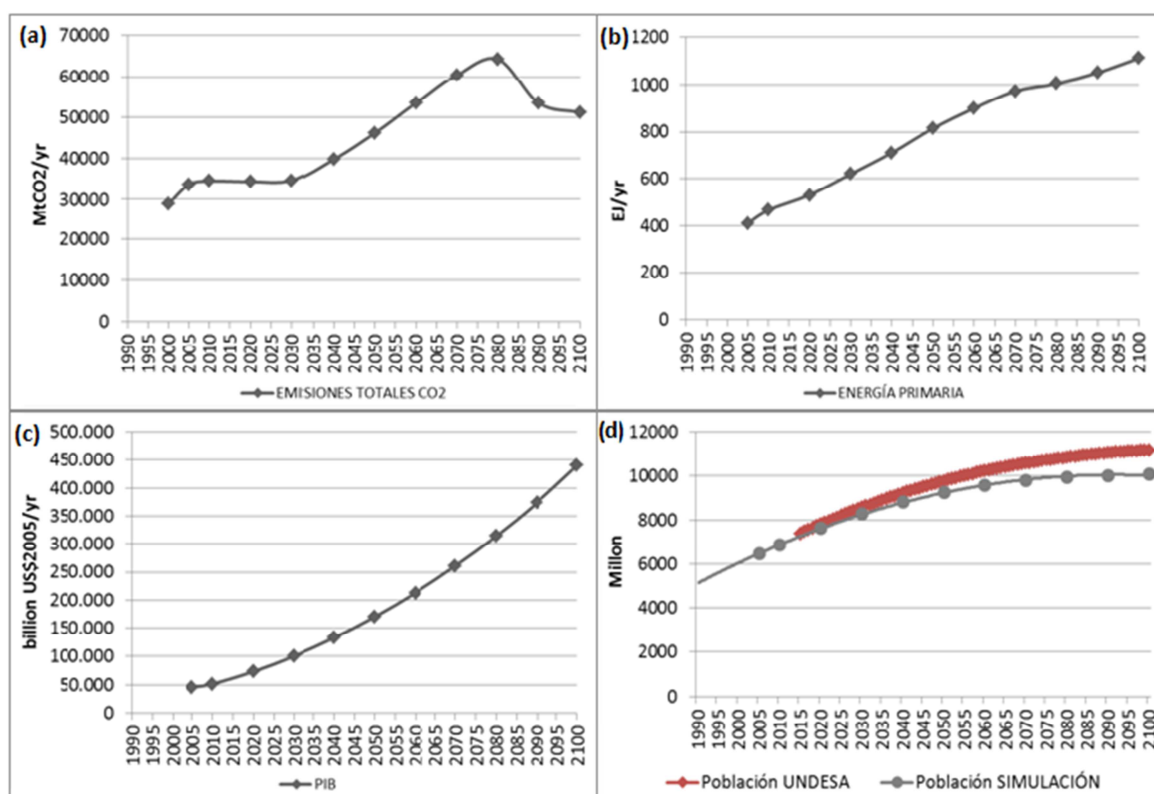


Figura 17. (a) Evolución de las emisiones de CO₂. (b) Evolución del consumo de energía primaria. (c) Evolución del PIB. (d) Evolución de la población según la base de datos. Fuente: Propia

Empezando por las emisiones de CO₂ se vuelve a reiterar la misma predicción comentada en puntos anteriores, donde se muestra un aumento de emisiones con una pendiente importante con un pico seguido de una reducción hasta valores ligeramente superiores a los 50.000 MtCO₂ (Figura 17. (a) Evolución de las emisiones de CO₂. (b) Evolución del consumo de energía primaria. (c) Evolución del PIB. (d) Evolución de la población según la base de datos. Fuente: Propia).

En cuanto al consumo de energía primaria se muestra una línea ascendente con un pendiente que se puede considerar constante a lo largo del periodo estudiado. Destacar que el consumo energético a finales de siglo prácticamente triplica el consumo que había en el año 2000, llegando a valores de más de 1.000 EJ anuales (Figura 17b).

El producto interior bruto (PIB) presenta un crecimiento que se podría considerar exponencial para este siglo XXI llegando a tener valores en el 2100 casi diez veces superiores a los que había en el año 2000 (Figura 17c).

Finalmente, analizando la población se prevé un aumento cada vez a un ritmo menor llegando a estabilizar prácticamente los niveles de población a finales de siglo. En este factor se ha considerado oportuno tener en cuenta una tercera base de datos, la predicción que realiza UNDESA (del inglés,

United Nations Department of Economic and Social Affairs) ya que ésta es más reciente y por tanto se presupone más acertada.

Comparando las bases de datos se puede ver como ambas tienen un comportamiento similar, sin embargo, los valores ofrecidos por UNDESA se estabilizan más tarde y por tanto muestran un escenario con una población mundial superior, casi llega a los 12.000 millones de habitantes mientras que la simulación MERGE_EMF27 se queda casi 2.000 millones por debajo, prediciendo una población mundial de 10.000 millones aproximadamente (Figura 17d).

Así, el escenario de futuro RCP 6.0 se queda corto en cuanto a la predicción del aumento de población que habrá durante las próximas décadas. Entonces, se puede asumir también que se queda corto en la predicción de emisiones ya que hay una relación de proporción directa entre el número de habitantes de una zona y la cantidad de emisiones que ésta tiene. Por este motivo, se aplicará la Identidad de Kaya teniendo en cuenta los dos escenarios futuros de población y así poder analizar qué diferencias puede implicar.

4.2.2. Evolución de los factores conductores y sus tasas de variación

Una vez aplicada la Identidad de Kaya, en este apartado se procede a analizar sus indicadores (Figura 18) y sus tasas de variación (Figura 19).

La intensidad energética, como se ha comentado antes, es el cociente entre el consumo de energía primaria y el producto interior bruto y representa cuán eficiente es el planeta ya que se emplea menos energía para crear el mismo trabajo o más. Analizando este indicador, se observa que su línea de tendencia es decreciente a lo largo de todo el siglo (Figura 18a). Que la intensidad energética decrezca tan bruscamente mientras el consumo de energía primaria crece año tras año puede entrar en controversia, pero esto viene a decir que cada vez la tecnología que se utiliza a nivel mundial es más eficiente. Con la misma cantidad de energía cada vez se puede producir más.

Juntando estos conceptos queda justificado que el crecimiento del PIB sea más rápido ya que aumentando el consumo de energía a la vez que se mejora la eficiencia la producción resulta aún más mayor.

La intensidad de carbono es el cociente entre las emisiones y el consumo de energía primaria y representa cuán limpias son las fuentes de energías utilizadas. Por tanto, a mayor uso de fuentes de energía renovables, menor intensidad de carbono debido a que las emisiones también son menores.

Fijándonos en la evolución de este indicador a lo largo de todo el siglo (Figura 18b), se puede ver como en estas primeras décadas ha disminuido considerablemente la intensidad de carbono debido a la aparición y a las primeras implantaciones de renovables i al impacto que se derivó de la crisis de

2008 que redujo el consumo de energía. A continuación, a partir de estos días hasta la década del 2070 hay un ligero crecimiento.

Esta subida se puede justificar con el aumento de demanda energética que tiene lugar durante todo este periodo y la estancación de la implantación de energías renovables. Llegando así a tener un pico cerca de finales de siglo que a su vez coincide con el pico de emisiones que se observa en la Figura 17. Pasado el pico y hasta el 2100 la intensidad de carbono disminuye bruscamente gracias a un nuevo impulso y apuesta hacia las energías renovables, la implantación de la tecnología CCS en las centrales térmicas y el cambio de uso del carbón por gas.

Por último, el PIB per cápita indica el nivel de riqueza de la población. Como se ha visto con anterioridad en la Figura 17. El producto interior bruto aumenta casi exponencialmente mientras que la población crece ligeramente y a menor ritmo a medida que pasan los años. Así, como era de esperar la tendencia del PIB per cápita es creciente durante todo el siglo. Comparando la evolución de este indicador según el escenario de futuro de población aplicado se aprecia que en el caso de los datos de población de UNDESA la tendencia de crecimiento tiene menor pendiente, es más lenta. Eso significa que el nivel económico de la población será mayor a finales de siglo pero no tanto como pronostica el escenario RCP 6.0 (Figura 18c).

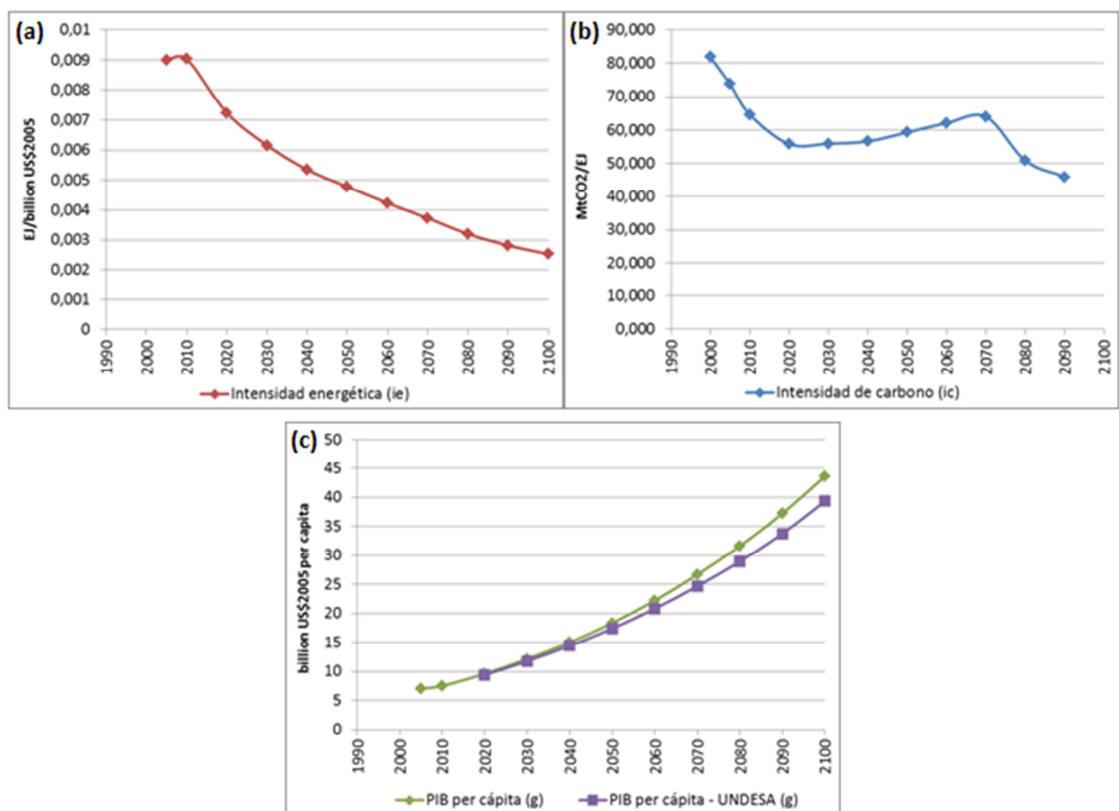


Figura 18. (a) Evolución de la intensidad energética. (b) Evolución de la intensidad de carbono. (c) Evolución del PIB per cápita según los datos de población. Fuente: Propia

Para poder apreciar con más detalle cómo y cuánto cambia cada uno de estos factores conductores se muestra la tasa de variación para cada factor en periodos que van de diez años en diez años a lo largo del siglo XXI (Figura 19).

A primera vista, se puede ver como el PIB per cápita y la población presentan siempre una tasa de variación positiva y en el caso de la intensidad energética se mantiene siempre negativa. En cambio, la tasa de variación de la intensidad de carbono es variable a lo largo del periodo considerado.

El PIB per cápita es el factor conductor que más crece. Presenta una tasa de variación más o menos constante tendiendo a disminuir en las últimas décadas, es decir, el ritmo de crecimiento es más lento a medida que se acerca al 2100. La población muestra un ritmo rápido de crecimiento en las primeras décadas y paulatinamente llega a finales de siglo con tasas de variación prácticamente nulas, lo que significa que el número de habitantes del planeta se estabilizaría.

La Identidad de Kaya se ha aplicado teniendo en cuenta las dos bases de datos de población comentadas con anterioridad. Aunque se ha visto que hay diferencia entre los valores totales de cada base de datos, sus tasas de variación son prácticamente idénticas y la diferencia no es apreciable.

La tasa de variación de la intensidad energética es mayor en las primeras y últimas décadas del siglo XXI coincidiendo con los momentos de mayor inversión en tecnologías más eficientes. Es el factor conductor que más decrece.

La intensidad de carbono es el factor conductor con la tasa de variación más variable. Hasta el 2030 la tasa permanece negativa y decrece rápidamente a causa de la introducción e implantación de fuentes de energía renovables. Posteriormente la tasa pasa a ser positiva, es decir, la intensidad de carbono crece hasta el momento en el que se alcanza el pico de emisiones alrededor del año 2070 igual que se ha visto en la figura anterior (Figura 18). A partir de ahí, los últimos años del siglo XXI la tasa vuelve a ser negativa indicando que se invertirá en fuentes renovables, tecnologías más eficientes y se reducirá el consumo de combustibles fósiles.

A raíz de que este escenario de futuro RCP6.0 presenta un pico de emisiones que a la vez representa un punto de inflexión en la tendencia energética del siglo XXI se analiza las tasas de variación diferenciando dos periodos, un primer periodo que comprende los años entre el 2020 y el 2060 y un segundo periodo que comprende los años entre el 2060 y el 2100. Con esta división se puede analizar más fácilmente la evolución a cada lado del pico.

A modo general se puede ver cómo tanto el nivel económico como la población tienen una tasa de variación positiva mayor durante el primer periodo. Por otro lado, la intensidad energética se mantiene constante con una tasa negativa en los dos periodos y por último, destacar que en el primer periodo la tasa de variación de la intensidad de carbono es casi nula, es decir el ritmo de

emisiones durante esos años prácticamente no cambia aunque sigue una tendencia de disminución. En el segundo periodo, la tasa de variación es mucho mayor señalando que los esfuerzos para reducir las emisiones han aumentado y que por tanto, igual que ya se ha mencionado en la figura anterior, las emisiones de CO₂ a la atmosfera disminuyen significativamente.

En la ecuación 4.3 se muestra la relación existente entre las tasas de variación de los factores conductores y la tasa de variación de las emisiones de CO₂. La suma de las tasas de variación de los factores conductores es igual a la tasa de variación de las emisiones de CO₂.

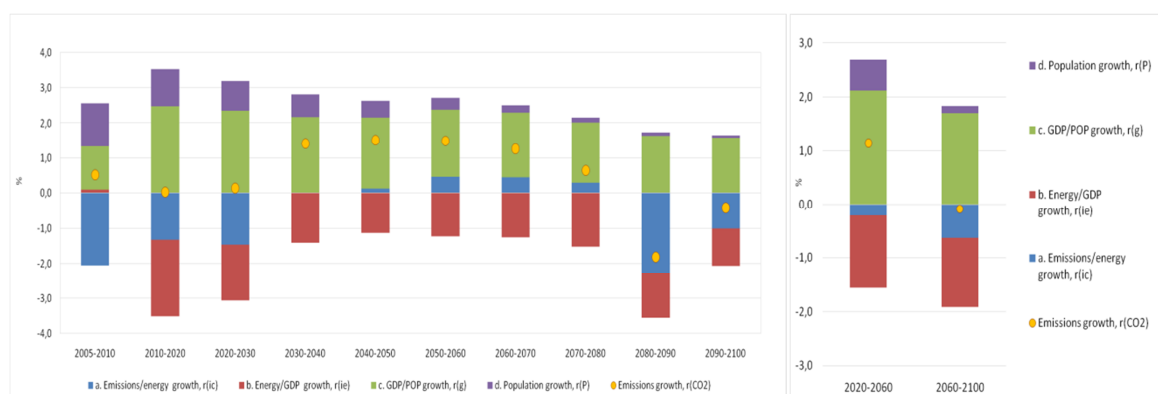


Figura 19. Evolución de las tasas de variación de los indicadores de la Identidad de Kaya. Fuente: Propia.

$$r(CO_2) = r(ic) + r(ie) + r(g) + r(Población) \quad (\text{Eq. 4.3})$$

Centrando la atención en la tasa de variación del CO₂ comentar como entre el 2010 y el 2030 se aprecia una estabilización de las emisiones como se había visto ya en anterioridad. Destacar también el cambio de tendencia brusco que se observa entre los años 2070 y 2090 donde la tasa pasa de positiva a negativa. El cambio de tendencia tiene lugar en las últimas décadas del siglo esto indica que en los próximos años vamos a seguir emitiendo cada vez más CO₂ hasta que suceda la reducción brusca alrededor del 2070 de la que se ha ido hablando durante todo el estudio.

4.2.3. Interpretación

De todo el análisis presentado en los apartados anteriores referente a la aplicación de la Identidad de Kaya el momento más interesante a interpretar es el periodo en que tiene lugar el pico de emisiones. El pico de emisiones coincide con el momento en que el crecimiento es cero, es decir, cuando se consigue estabilizar el ritmo de emisiones.

Comparando los valores de las tasas del periodo 2070-2080 con el 2080-2090 se ve que las tasas ie, g y P prácticamente se mantienen. Así, la estrategia que se sigue para lograr este cambio se centra en reducir bruscamente la intensidad de carbono, ic. Esta reducción es la evidencia de que tiene lugar

una transición energética. Queda demostrada la predicción que se presentaba en la descripción del escenario RCP 6.0 (apartado 2.3.) al iniciar del trabajo.

A la hora de interpretar bien los resultados de las predicciones de los escenarios de futuro presentados a lo largo del trabajo es bueno compararlos con una referencia. Los escenarios de referencia utilizados en este caso son los escenarios BAU extraídos de Argilès, 2017. Los datos de los factores conductores del escenario RCP 6.0 han sido armonizados para poder realizar la comparación.

Los escenarios BAU son escenarios tendenciales que basan la proyección de los factores conductores con la misma tasa de variación histórica [4], es decir, son escenarios de futuro que representan la tendencia histórica. El periodo que comprenden los escenarios BAU corresponde a la primera mitad del siglo XXI.

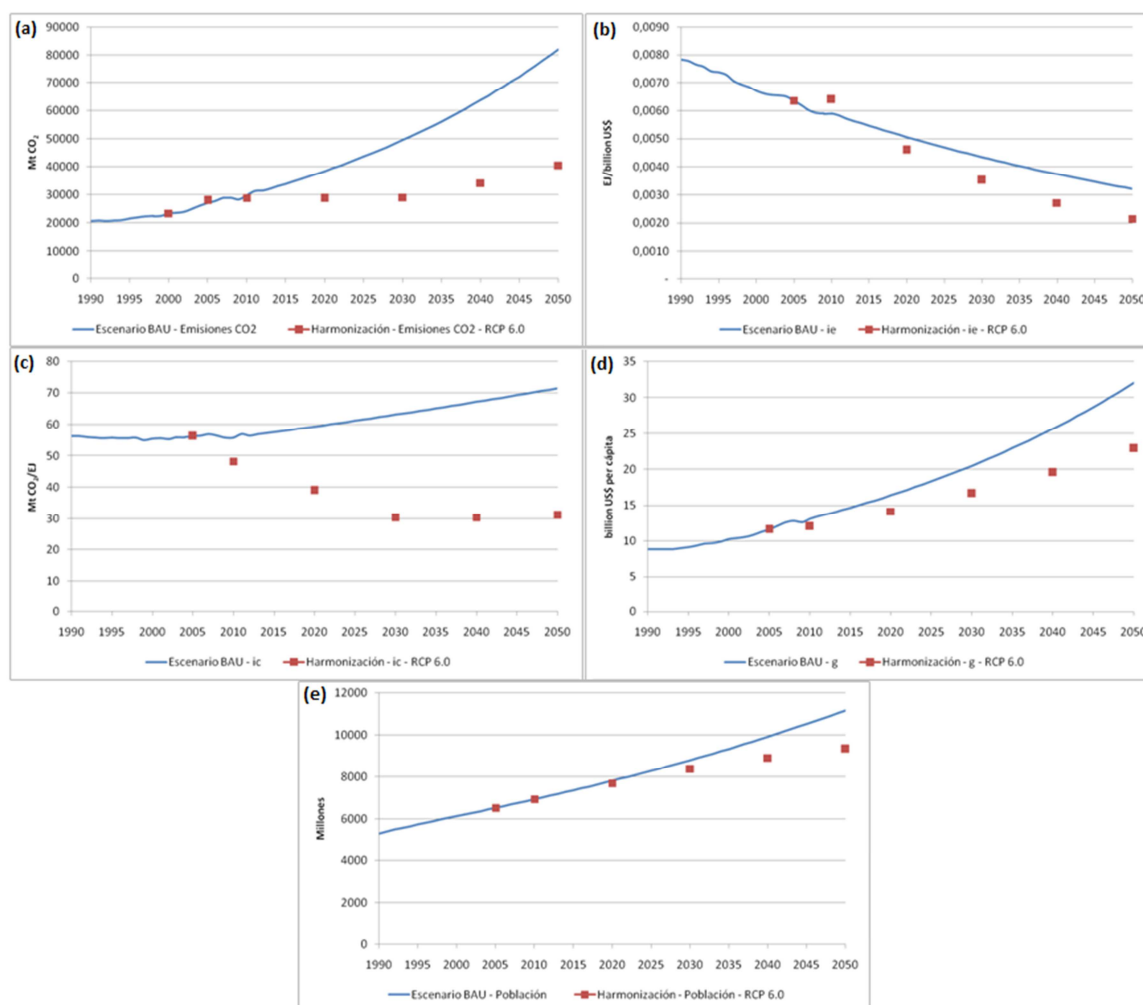


Figura 20. (a) Comparación de la evolución de las emisiones de CO₂ del RCP 6.0 referenciado al escenario BAU. (b) Comparación de la evolución de ie del RCP 6.0 referenciado al escenario BAU. (c) Comparación de la evolución de ic del RCP 6.0 referenciado al escenario BAU. (d) Comparación de la evolución de g del RCP 6.0 referenciado al escenario BAU. (e) Comparación de la evolución de la población del RCP 6.0 referenciado al escenario BAU. Fuente: Propia

A primera vista se puede decir que en el caso de i_e , g y de la población el escenario RCP 6.0 se encuentra por debajo de la curva del escenario BAU pero en general la tendencia en ambos casos se puede considerar similar (Figura 20).

Donde se rompe con la tendencia histórica es en el caso de las emisiones de CO_2 y de la i_c , factores que están interrelacionados ya que i_c equivale al cociente entre emisiones y energía primaria consumida. Aunque la comparación no abarque los años en que tiene lugar el pico de emisiones, ya se puede ver como desde las primeras décadas las emisiones y por tanto la i_c disminuyen drásticamente en comparación con la tendencia de los escenarios BAU. Aquí es donde queda reflejado que el escenario RCP 6.0 es un escenario de intervención política ya que sin políticas de mitigación de las emisiones este cambio de tendencia no podría suceder.

CONCLUSIONES

A lo largo de este último punto se presentan las principales conclusiones que se extraen de este trabajo. Se hace una conclusión del análisis del escenario de futuro de emisiones RCP 6.0 diferenciando entre los dos puntos de vista aplicados. Un primer punto referente a la parte más científica donde se ha analizado el forzamiento radiativo, las emisiones y las concentraciones de GHG a lo largo del siglo XXI. Un segundo punto referente a la parte más social donde se ha analizado la realidad socio-económica del mundo a partir de la Identidad de Kaya y sus factores conductores. Finalmente se realiza una valoración del estado en el que actualmente se encuentra el planeta, hacia qué consecuencias climáticas derivaríamos al seguir este escenario y qué opciones de mitigación están al alcance.

Entrando en el primer punto, lo primero que se puede concluir es que las dos bases de datos usadas son equivalentes ya que coinciden en la evolución de los tres gases GHG estudiados tanto en el pronóstico de emisiones como en el de concentraciones y el de forzamiento radiativo. Solamente se puede destacar una ligera diferencia en el caso del escenario de futuro de emisiones de N_2O . Curiosamente la tendencia de crecimiento en los dos casos es semejante sin embargo los valores de IIASA están ligeramente por encima de los valores de Potsdam.

Referente a la concentración de GHG los resultados obtenidos están dentro del rango de valores pronosticados. Se obtiene una concentración de 832 ppm frente al rango de 720 – 1000 ppm publicado para el escenario RCP 6.0.

En cuanto a las emisiones de CO_2 los valores obtenidos coinciden con lo pronosticado en el escenario RCP 6.0. Se prevé que el pico de emisiones llegue a valores de 17,5 GtC frente a 17,7 GtC y para finales de siglo se prevé que se disminuya hasta 13,9 GtC frente a 13 GtC. Lo más destacable en cuanto a las emisiones de CO_2 es que lo publicado para el RCP 6.0 muestra el pico alrededor de la década del 2060, en cambio, los resultados del análisis realizado en base a los datos de consumo energético, PIB y población del IIASA retrasan este pico hasta el 2080. Esto se traduce a que la transición energética tendrá lugar más tarde y por tanto las emisiones acumuladas aumentarán.

Por último, sobre el forzamiento radiativo decir que para el 2100 se prevé que sea de $5,9 W/m^2$, por tanto se mantiene por debajo de los $6 W/m^2$. Se puede concluir que se cumple la premisa de este escenario futuro de emisiones RCP 6.0 que es el de no superar este valor límite en el 2100.

Pasando al segundo punto, empezar resumiendo la evolución socio-económica del mundo para lo que queda de siglo XXI según este escenario. Se prevé que la población siga aumentando pero que en las últimas décadas se estabilice alrededor de los 11.000 millones de habitantes y que el PIB y el

consumo de energía primaria crezca año tras año llegando a consumir más de 1.000 EJ/año en el 2100 valor bastante superior al publicado en el escenario RCP 6.0 que pronostica un consumo a finales de siglo de 838 EJ/año. Esta diferencia queda justificada por el retraso de la transición energética ya que aumenta el periodo en el que el consumo sigue creciendo.

El momento más interesante a estudiar de todo el período es el correspondiente al pico de emisiones. Analizando las tasas de variación de los factores conductores de la Identidad de Kaya se puede extraer el plan de actuación previsto para estabilizar las emisiones en este punto de inflexión y poder pasar a un ritmo de emisiones negativo.

Comparando las tasas de variación antes y después del pico se aprecia que tanto PIB per cápita, como la población y la intensidad energética no presentan cambios considerables en su comportamiento. Por tanto, la estrategia que se sigue para lograr este crecimiento nulo de emisiones se centra en la reducción brusca que sufre la intensidad de carbono. De nuevo, esta reducción tan fuerte es el reflejo de que tiene lugar una transición energética. Por definición, la intensidad de carbono es el cociente entre la cantidad de CO₂ emitido por cada fuente de energía consumida y/o producida dividido por la energía primaria total consumida, por tanto, que este valor disminuya significa que ha sucedido un cambio en el vector energético mundial aumentando la presencia de energías renovables y tecnologías más eficientes y reduciendo el consumo de combustibles fósiles en especial el carbón que es la fuente de energía con el factor de emisiones más elevado.

Finalmente concluir que a partir del estudio realizado en este trabajo se ha demostrado la evidencia de que la transición energética que el escenario RCP 6.0 prevé tendrá lugar un par de décadas más tarde. La consecuencia principal de este retraso se refleja en un aumento de las emisiones acumuladas. El valor de emisiones acumuladas obtenido es de 4.299 GtCO₂.

El escenario RCP 6.0 pronostica unas emisiones acumuladas durante el periodo 2011 – 2100 de entre 3.620 – 4.990 GtCO₂ valores muy alejados de las emisiones acumuladas, o Global Carbon Budget, del escenario de los 2°C que limita las emisiones acumuladas a 1000 GtCO₂ si se quiere cumplir el objetivo marcado en el Acuerdo de París de limitar el aumento de temperatura de la superficie terrestre a 2°C.

Si se cumpliera estos pronósticos evolucionando en el tiempo siguiendo el escenario de futuro RCP 6.0 llegaríamos a finales de siglo con una temperatura en la superficie terrestre entre 3,5°C y 4°C superior en referencia a los valores de la era preindustrial.

En un mundo 3,5°C y 4°C más caliente se sufrirían consecuencias devastadoras. El clima sería cada vez más caótico y nos obligará a realizar cambios ecológicos y energéticos desplazando a millones de personas que se podrían considerar refugiados climáticos. El nivel del mar aumentaría alrededor de

medio metro a consecuencia de la pérdida de hielo de los polos, produciendo cambios geográficos, muchas islas desaparecerían y podríamos estar delante de migraciones humanas a zonas más elevadas e interiores, con los consecuentes conflictos. El aumento de la temperatura también fundiría las nieves perpetuas de las altas montaña y glaciares que, aunque durante el proceso de deshielo haría que los ríos nutridos por estas nieves tengan un mayor caudal, a larga, cuando ya no haya nieve, se secarán provocando graves problemas de suministro de agua. Se augura un crecimiento de las zonas desérticas, pérdidas de zonas de cultivo, sequías y la falta de agua potable pudiendo comportar una crisis alimentaria global.

En general, el mundo sería un lugar más inestable en el que vivir y aunque el futuro descrito anteriormente parece escalofriante todavía estamos a tiempo de evitarlo.

Según las conclusiones extraídas de un estudio realizado por Robert Socolow y Steve Pacala de la Universidad de Princeton, Nueva Jersey, [3] se podría acabar con la tendencia al alza de las emisiones o llegar a estabilizarlas poniendo freno a la destrucción de los bosques tropicales. Las estimaciones sugieren que la desforestación de los trópicos de Brasil e Indonesia son dos de los mayores emisores de carbono del mundo. Tendríamos que aumentar la eficiencia de nuestros coches y edificios, reducir el parque automovilístico, reducir nuestras necesidades energéticas, aumentar la eficiencia de las centrales térmicas, construir millones de turbinas eólicas de un megavatio para generar electricidad y cubrir millones de hectáreas con paneles solares preferiblemente en las cubiertas de edificios y en zonas desérticas. Además, se contempla la difícil decisión de inyectar miles de millones de toneladas de CO₂ bajo tierra o invertir en 1.400 nuevas centrales eléctricas de gas.

Sea como sea lo que es evidente es que no debemos llegar a lo que pronostica el escenario RCP 6.0, el cual como he dicho, está muy lejos de cumplir el objetivo marcado en el Acuerdo de París de limitar el aumento de la temperatura terrestre 2°C.

Sólo una combinación de eficiencia, amplia variedad de nuevas tecnologías, concienciación social y políticas adecuadas nos ofrecerán alguna posibilidad de estabilizar la crisis climática.

ANÁLISIS DE IMPACTO AMBIENTAL

Debido al tipo de TFG llevado a cabo, el impacto ambiental es mínimo. Las emisiones de CO₂ derivadas de la realización del proyecto son de 17,17 kg de CO₂. Dentro del estudio del impacto ambiental se ha tenido en cuenta:

- **MATERIAL OFICINA:** El uso de material de oficina, en su mayoría folios y material de escritura en las reuniones de seguimiento del trabajo e impresiones varias de fuentes de datos.
- **RECURSOS INFORMÁTICOS:** El consumo energético de un portátil Lenovo de 60W de potencia donde se ha realizado el trabajo. Considerando en primer lugar que el TFG equivale a 24 créditos y éstos a 600 h más unas 36 h de trabajo extra se contabilizan 636 horas de trabajo. Convirtiendo las horas en energía, se obtiene un consumo de 42 kWh.
Según la oficina catalana sobre el cambio climático, el mixto de la red eléctrica peninsular (valor que expresa las emisiones de CO₂ asociadas a la generación de electricidad) en el 2017 se aproxima en 392 g CO₂/kWh. Así, se puede estimar con un cálculo rápido que el impacto derivado del uso del ordenador portátil equivale a unas emisiones de 16,464 kg de CO₂.
- **TRANSPORTE:** Los desplazamientos tanto de ida como de vuelta a la universidad para realizar el seguimiento del trabajo con la tutora. Los trayectos se llevaron a cabo en transporte público, concretamente en tranvía. El tranvía es un vehículo con tracción 100% eléctrica, por tanto, no genera emisiones directas. Contando el impacto derivado del consumo eléctrico del tranvía, la aplicación móvil TRAM incluye una EcoCalculadora que, al introducir un trayecto te calcula las emisiones producidas por usuario, entre otros datos.
Para el trayecto Glorias-Campus Diagonal Besós se emiten 50,33 g de CO₂. Contando dos trayectos por visita con la tutora y teniendo en cuenta de que se han realizado siete visitas el total de emisiones debidas al transporte resultan de 704,62 g de CO₂.

ANÁLISIS AMBIENTAL

	Consumo	Factor de emisiones	Total
Recursos Informáticos	42 kWh	392 gCO ₂ /kWh	16,464 kg de CO ₂
Transporte	14 trayectos	50,33 gCO ₂ /trayecto	0,70462 kg de CO ₂
TOTAL			17,17 kg de CO₂

ANÁLISIS ECONÓMICO

En el siguiente apartado se expone el presupuesto estimado de elaborar el presente trabajo de final de grado, TFG. Se desglosa el presupuesto en: mano de obra, material e impuestos.

- **MANO DE OBRA:** El precio de mano de obra considerado ha sido extraído de la página web del Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña (ITEC). El coste de un técnico medio o superior es de 36,59 €/h. Restando un 40% al considerar la falta de experiencia laboral el resultado queda en 22 €/h.
Como se detalla en la siguiente tabla, se distingue entre días festivos, días no trabajados (que incluye también los días festivos) y días trabajados. A partir del total de horas dedicadas al proyecto se aproxima una media de horas diarias.
- **MATERIAL:** El material considerado es un ordenador portátil Lenovo (4 años de antigüedad) que ha sido el utilizado para realizar el trabajo, una libreta estándar din A4 y material de escritura.
- **IMPUESTOS:** Se aplica el IVA del 21%.

HORAS DE TRABAJO

Días Totales	Fecha Inicio	Fecha Final	Días Totales
	05/02/2018	05/06/2018	120
Días Trabajados	Días Festivos	Días No trabajados	Días Trabajados
	20 días	14 días	106
Horas Dedicadas	Media diaria		Horas Totales
	6 horas		636 horas
HORAS DE TRABAJO	636 h	22 €/h	13.992 €

PRESUPUESTO

		Precio Unitario	Total
Mano de obra	636 horas	22 €/h	13.992 €
Material	Ordenador portátil	450 €/u	450 €
	Libreta din A4	2,75 €/u	2,75 €
	2x Bolígrafos	0,80 €/u	1,60 €
Impuestos	Total sin IVA		14.446,35 €
	21% IVA		3.033,74 €
TOTAL			17.480,08 €

BIBLIOGRAFÍA

- [1] IPCC. 2007. Cambio Climático 2007: Informe de Síntesis. Contribución de Los Grupos de Trabajo I, II Y III Al Cuarto Informe de Evaluación Del Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre El Cambio Climático. Nature. Vol. 446. <https://doi.org/10.1038/446727a>.
- [2] Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V.B. and P.M.M. Summary for policymakers. A: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [en línea]. 2013. [Consulta: 2 setembre 2016]. Disponible a: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf>.
- [3] Lynas, M. *Seis grados: el futuro en un planeta más cálido*. Barcelona: Libbooks, 2014. ISBN 9788494183553
- [4] Mor, Gerard Argilés, and Olga Alcaraz. 2017. "Grau En Enginyeria de L' Energia ESCENARIS DE FUTUR DE LES EMISSIONS MUNDIALS EN BASE A L' ANÀLISI DELS FACTORS CONDUCTORS D' AQUESTES . Memòria"
- [5] World Meteorological Organization. The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2014. A: *WMO Greenhouse Gas Bulletin* [en línea]. 2015, Vol. No. 11, p. 1-4. ISSN 2078-0796. [Consulta: 17 setembre 2016]. Disponible a: <http://library.wmo.int/pmb_ged/ghg-bulletin_11_en.pdf>
- [6] United Nations. 1992. "United Nations Framework Convention on Climate Change." Fccc/Informal/84 1 (3):270–77. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9388.1992.tb00046.x>.
- [7] UNFCCC. Paris Agreement. A: 21st Conference of the Parties [en línea]. 2015. [Consulta: 28 desembre 2016]. Disponible a: <http://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf>.
- [8] UNFCCC. 2016. "Aggregate Effect of the Intended Nationally Determined Contributions: An Update." Ge, no. May:16–7126. <https://doi.org/10.1093/iclqaj/24.3.577>.
- [9] United Nations Framework Convention for Climate Change. 2015. "Synthesis Report on the Aggregate Effect of the Intended Nationally Determined Contributions" FCCC/CP (October):1–66. <https://doi.org/10.1093/iclqaj/24.3.577>.

- [10]Meinshausen, Malte, S. J. Smith, K. Calvin, J. S. Daniel, M. L.T. Kainuma, J. Lamarque, K. Matsumoto, et al. 2011. "The RCP Greenhouse Gas Concentrations and Their Extensions from 1765 to 2300." *Climatic Change* 109 (1):213–41. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0156-z>.
- [11]Masui, Toshihiko, Kenichi Matsumoto, Yasuaki Hijioka, Tsuguki Kinoshita, Toru Nozawa, Sawako Ishiwatari, Etsushi Kato, P. R. Shukla, Yoshiki Yamagata, and Mikiko Kainuma. 2011. "An Emission Pathway for Stabilization at 6 Wm⁻²radiative Forcing." *Climatic Change* 109 (1):59–76. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0150-5>.
- [12]Hurt, G. C., L. P. Chini, S. Frolking, R. A. Betts, J. Feddema, G. Fischer, J. P. Fisk, et al. 2011. "Harmonization of Land-Use Scenarios for the Period 1500-2100: 600 Years of Global Gridded Annual Land-Use Transitions, Wood Harvest, and Resulting Secondary Lands." *Climatic Change* 109 (1):117–61. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0153-2>.
- [13]Emori, Seita, Karl Taylor, Bruce Hewitson, Fernanda Zermoglio, Martin Juckes, Michael Lautenschlager, and Martina Stockhause. 2016. "CMIP5 Data Provided at the IPCC Data Distribution Centre." Fact Sheet of the Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Analysis (TGICA) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), no. September:1–8.http://www.ipcc-data.org/docs/factsheets/TGICA_Fact_Sheet_CMIP5_data_provided_at_the_IPCC_DDC_Ver_1_2016.pdf.
- [14]Vuuren, Detlef P. van, James A. Edmonds, Mikiko Kainuma, Keywan Riahi, and John Weyant. 2011. "A Special Issue on the RCPs." *Climatic Change* 109 (1):1–4. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0157-y>.
- [15]Vuuren, Detlef P. van, Jae Edmonds, Mikiko Kainuma, Keywan Riahi, Allison Thomson, Kathy Hibbard, George C. Hurtt, et al. 2011. "The Representative Concentration Pathways: An Overview." *Climatic Change* 109 (1):5–31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>.
- [16]UNEP. 2017. The Emissions Gap Report 2017. United Nations Environment Programme (UNEP). https://doi.org/ISBN_978-92-9253-062-4.
- [17]Moss, Richard, Mustafa Babiker, Sander Brinkman, Eduardo Calvo, Tim Carter, Jae Edmonds, Ismail Elgizouli, et al. 2008. Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts and Response Strategies. IPCC Expert Meeting Report. <https://doi.org/10.1086/652242>.
- [18]Garcia-Marmolejo, G., L. Chapa-Vargas, E. Huber-Sannwald, M. Weber, O. C. Rosas-Rosas, J. Martinez-Cardenas, Hugo Fernando López-Arévalo, et al. 2011. "Niche Partitioning Among

White-Lipped Peccaries (Tayassu Pecari), Collared Peccaries (Pecari Tajacu), and Feral Pigs (Sus Scrofa).” *Journal of Mammalogy* 11 (4):3. <https://doi.org/10.1086/652242>.

- [19] Clarke, Leon E., K. Jiang, K. Akimoto, M. Babiker, G. Blanford, K. Fisher-Vanden, J.-C. Hourcade, et al. 2014. “Assessing Transformation Pathways.” *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 413–510. https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_chapter6.pdf.
- [20] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2010. “IPCC Workshop on Socio-Economic Scenarios.” IPCC Workshop on Socio-Economic Scenarios, Victor’s Residenz-Hotel, Berlin, Germany, 1-3 November 2010, no. November:1–61.
- [21] Myhre, Gunnar, Drew Shindell, Francois-Marie Bréon, William Collins, Jan Fuglestad, Jianping Huang, Dorothy Koch, et al. 2013. “Anthropogenic and Natural Radiative Forcing.” *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 659–740. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.018>.
- [22] United Nations. 2004. “World Population To 2300.” *New York* 18 (3):553–61. <https://doi.org/10.1016/j.asieco.2007.02.015>.
- [23] IPCC. 2007. *Cambio Climático 2007: Informe de Síntesis. Contribución de Los Grupos de Trabajo I, II Y III Al Cuarto Informe de Evaluación Del Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre El Cambio Climático*. *Nature*. Vol. 446. <https://doi.org/10.1038/446727a>.
- [24] IIASA. RCP Database. En: IIASA. International Institute for Applied Systems Analysis [en línea]. Versión 2.0.5 [Consulta: abril 2018]. Disponible en: <http://tntcat.iiasa.ac.at:8787/RcpDb/dsd?Action=htmlpage&page=compare>
- [25] PIK. RCP Scenario data group. En PIK. Potsdam Institute for Climate Impact Research [en línea] [Consulta: abril 2018]. Disponible en: <http://www.pik-potsdam.de/~mmalte/rcps/index.htm>